

考虑土体非线性 CCSG 桩复合地基固结解

蔡燕燕¹, 王 海², 戚志博², 关云飞³

(1. 华侨大学 岩土工程研究所, 福建 厦门 361021; 2. 中交第一公路勘察设计研究院有限公司, 西安 陕西 710075;
3. 南京水利科学研究院 岩土工程研究所, 江苏 南京 210024)

摘 要: 混凝土芯砂石桩 (CCSG) 桩复合地基是一种新型多元复合地基。通过引入地基土体的 $e\text{-lg}\sigma$ 和 $e\text{-lg}k$ 对数模型, 考虑地基土体固结过程中压缩模量和渗透系数非线性变化的特征, 推导出基于等应变假设的 CCSG 桩复合地基非线性固结解析解, 且现有的考虑土体非线性的砂井固结解和碎石桩复合地基固结解均是文中解的特例。根据该解析解得到桩土模量比、土体压缩指数与渗透指数比、荷载增量等无量纲参数变化时, CCSG 桩复合地基的固结度曲线。分析结果表明, 按应力和按变形定义的两种固结度不相等, 通常按变形定义的固结速度较快; 土体压缩模量和渗透系数的非线性变化对固结影响较大。最后通过和由实测数据获得的固结度曲线对比, 验证了解析解的正确性。

关 键 词: 混凝土芯砂石桩; 复合地基; 固结解析解; 土体非线性

中图分类号: TU 473

文献标识码: A

文章编号: 1000-7598-(2015) 增 1-0639-07

Analytical solution for consolidation of CCSG pile composite foundation by considering nonlinearity of soil

CAI Yan-yan¹, WANG Hai², QI Zhi-bo², GUAN Yun-fei³

(1. Institute of Geotechnical Engineering, Huaqiao University, Xiamen, Fujian 361021, China;

2. CCCC First Highway Consultants Co., Ltd., Xi'an, Shaanxi 710075, China;

3. Department of Geotechnical Engineering, Nanjing Hydraulic Research Institute, Nanjing, Jiangsu 210024, China)

Abstract: Concrete-cored sand-gravel (CCSG) pile composite foundation is a new multi-type composite foundation. By incorporating the logarithm models of $e\text{-lg}\sigma$ and $e\text{-lg}k$ of soil, the characteristics of the nonlinear variation in the soil's compressive modulus and the soil's permeability during consolidation are considered. Based on equal strain assumption, the analytical solution is developed for CCSG pile composite foundation, which combined with itself characteristics and stress concentration effects. The existing consolidation solutions of sand drain foundation and gravel pile composite foundation under nonlinear characteristics of soil are special cases of this solution. Curves of the average consolidation degree of the composite foundation were observed based on the theoretical formula under the variation of various non-dimensional parameters such as the ratio of pile-soil modulus and soil compression index and penetration index, and load increment. The analytical results show that the average degree of consolidation in terms of stress is not equal to that in terms of deformation; in addition, the average degree of consolidation in terms of stress is greater than that in terms of deformation; the nonlinear characteristics of soil have a large affect on consolidation. The analytical solution is finally validated with the actual measurement data.

Keywords: concrete-cored sand-gravel (CCSG) pile; composite foundation; analytical solution for consolidation; nonlinear soil

1 引 言

CCSG 桩 (低标号混凝土芯砂石桩, low-grade concrete-cored sand-gravel pile) 复合地基是一种新型多元复合地基技术。由低标号混凝土芯桩和外包砂石壳 (竖向增强体和排水体)、加筋碎石垫层 (水

平褥层和排水体) 联合桩间土组成, 可以较好地控制软基工后沉降^[1], 借助已有的考虑应力集中、附加应力非均布、土体渗透系数沿径向变化、外荷载逐渐施加等情况的复合地基固结理论^[2-5], 可实现 CCSG 桩复合地基固结性状分析。但是, 上述固结理论均建立在土体渗透系数、压缩模量均不变的假

设基础上。实际工程中随着孔隙水的排出,地基土压缩模量会逐渐增大,渗透系数会逐渐减小,即土体呈现压缩模量非线性增长、渗透系数非线性下降的特征。

考虑土体非线性特征的固结理论尚未完善。Lekha 等^[6]通过引入对数模型,给出可考虑土体压缩模量和渗透系数非线性变化的砂井和天然地基固结解。Indraratna 等^[7]采用对数模型获得了砂井径向固结的近似解。卢萌盟等^[8]给出了一种考虑土体非线性和应力集中的碎石桩复合地基的固结解析解。对 CCSG 桩复合地基这类含两种不同材料桩与桩间土组成的多元地基,土体非线性问题同样突出。俞缙等^[9]考虑扰动区土体水平渗透系数变化的 CCSG 桩复合地基固结计算方法,也是基于线性固结理论获得的,对土体非线性的考虑存在不足。鉴此,引入 $e\text{-lg}\sigma$ 和 $e\text{-lg}k$ 对数模型,推导获得考虑土体非线性和应力集中效应的 CCSG 桩复合地基固结解析解,并对其固结性状进行分析。通过和由实测数据获得的固结度曲线对比,验证了解析解的正确性。

2 计算模型及基本假定

图 1 为 CCSG 桩复合地基固结简化模型。图中, H 为软土层厚度; q 为均布外荷载; r_c 、 r_w 、 r_s 、 r_e 分别为芯桩半径、砂石壳半径、地基扰动区半径和未扰动区半径; r 、 z 分别为径向和竖向坐标。

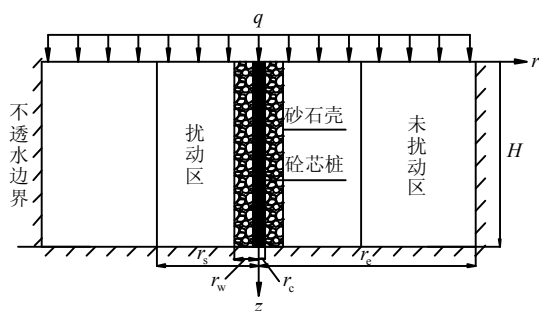


图 1 CCSG 桩复合地基固结模型示意图
Fig.1 Sketch of consolidation of CCSG pile composite ground

推导过程中的基本假定: (1) 忽略混凝土芯桩与砂石壳的相对位移, 等应变假设成立, 即复合地基无侧向变形, 同一深度任一点的竖向变形相等。桩芯简化为相应半径的圆柱形不透水桩, 不考虑混凝土芯和砂石壳相互作用的影响。(2) 只考虑砂石壳内径向渗流而忽略竖向渗流。(3) 考虑施工扰动对土体的扰动影响。(4) 假定砂石壳内无井阻, 即砂石壳内任一时刻孔压均为 0。(5) 土中水的渗流服从 Darcy 定律。(6) 依据文献^[6], 假设土体的

压缩性和渗透性均随土体固结呈非线性变化, 且符合对数关系, 即

$$\bar{e} = e_0 - C_c \lg \left(\frac{\bar{\sigma}_{st}}{\bar{\sigma}_{si}} \right) \quad (1)$$

$$\bar{e} = e_0 + C_k \lg \left(\frac{k_h}{k_{hi}} \right) \quad (2)$$

式中: e 、 e_0 分别为土体 t 时刻孔隙比和初始孔隙比; C_c 、 C_k 分别为压缩指数和渗透指数; $\bar{\sigma}_{st}$ 为土体 t 时刻有效应力; $\bar{\sigma}_{si}$ 为土体初始有效应力, 假设为常数; k_h 、 k_{hi} 分别为未扰动区土体 t 时刻水平向渗透系数和初始水平向渗透系数。(7) 在固结过程中桩体会因竖向变形而被挤密, 其压缩模量随着复合地基的固结与土体的压缩模量同比例增长, 即

$$Y = E_w/E_s, \quad X = E_c/E_s \quad (3)$$

式中: E_c 、 E_w 、 E_s 分别为低标号混凝土芯桩、砂石外壳和土体的压缩模量。

3 方程推导及求解

CCSG 桩复合地基平衡方程可写为

$$\pi r_c^2 \bar{\sigma}_c + \pi (r_w^2 - r_c^2) (\bar{\sigma}_s + \bar{u}_s) + \pi (r_w^2 - r_c^2) \bar{\sigma}_w = \pi r_c^2 \sigma_0 \quad (4)$$

式中: $\bar{\sigma}_c$ 、 $\bar{\sigma}_w$ 、 $\bar{\sigma}_s$ 分别为外部荷载在低标号混凝土芯桩、砂石外壳和地基土体内引起的平均有效应力; $\bar{u}_s$ 为任一深度处土体内的平均孔压; σ_0 为外部荷载 q 在复合地基任一深度截面处引起的平均附加应力。

由式(4)及基本假定(7)可得

$$\bar{\sigma}_s = \frac{n^2 \sigma_0}{n^2 - 1 + Y + \alpha} - \frac{n^2 - 1}{n^2 - 1 + Y + \alpha} \bar{u}_s \quad (5)$$

式中: $n = r_e/r_w$; $\alpha = m^2(X - Y)$, $m = r_c/r_w$ 。

土体内 t 时刻的平均有效应力为初始有效应力和外部荷载在土体内引起的平均有效应力之和, 即

$$\bar{\sigma}_{st} = \bar{\sigma}_{si} + \bar{\sigma}_s = \bar{\sigma}_{si} + \frac{n^2 \sigma_0}{n^2 - 1 + Y + \alpha} - \frac{n^2 - 1}{n^2 - 1 + Y + \alpha} \bar{u}_s \quad (6)$$

假设从地基桩土微圆环内侧流出的水流速度为 v , 流量为 Q , 则因为水流连续, 故从微圆环体外侧流入的水流速度为 $v + \frac{\partial v}{\partial r}$, 故地基桩土微圆环体内水量变化率为

$$\frac{\partial Q}{\partial t} = v(2\pi r) - \left(v + \frac{\partial v}{\partial r} dr \right) [2\pi(r + dr)] \quad (7)$$

略去高阶微量, 式 (2) 可以简化为

$$\frac{\partial Q}{\partial t} = -2\pi r \left(v + r \frac{\partial v}{\partial r} \right) \quad (8)$$

假设地基桩土微圆环体积为 V , ε_v 为地基任一深度的体应变, 则其体积变化率为

$$\frac{\partial V}{\partial t} = \frac{\partial \varepsilon_v}{\partial t} [\pi(r+dr)^2 - \pi r^2] \quad (9)$$

同样, 略去高阶微量可将上式简化为

$$\frac{\partial V}{\partial t} = 2\pi r dr \frac{\partial \varepsilon_v}{\partial t} \quad (10)$$

由于微圆环体内水量的变化率应等于其体积的变化率, 即 $\frac{\partial Q}{\partial t} = \frac{\partial V}{\partial t}$, 所以

$$\frac{v}{r} + \frac{\partial v}{\partial r} = -\frac{\partial \varepsilon_v}{\partial t} \quad (11)$$

由式 (11) 并结合 Darcy 定律可得到 CCSG 桩复合地基未扰动区和扰动区的固结方程:

$$\left. \begin{aligned} \frac{k_h}{y_w} \left(\frac{1}{r} \frac{\partial u_n}{\partial r} + \frac{\partial^2 u_n}{\partial r^2} \right) &= -\frac{\partial \varepsilon_v}{\partial t}, \quad (r_s \leq r \leq r_e) \\ \frac{k_s}{y_w} \left(\frac{1}{r} \frac{\partial u_d}{\partial r} + \frac{\partial^2 u_d}{\partial r^2} \right) &= -\frac{\partial \varepsilon_v}{\partial t}, \quad (r_w \leq r \leq r_s) \end{aligned} \right\} \quad (12)$$

式中: u_n 、 u_d 分别为 CCSG 桩复合地基未扰动区和扰动区的孔压; k_h 、 k_s 分别为 t 时刻土体未扰动区和扰动区土体水平向渗透系数; y_w 为水的重度。

固结方程求解条件为

$$\left. \begin{aligned} ① \quad r &= r_e, \quad \partial u_n / \partial r = 0 \\ ② \quad r &= r_s, \quad k_s \frac{\partial u_d}{\partial r} = k_h \frac{\partial u_n}{\partial r} \\ ③ \quad r &= r_s, \quad u_d = u_n \\ ④ \quad r &= r_w, \quad u_d = 0 \\ ⑤ \quad r &= r_w, \quad \partial u_w / \partial r = 0 \end{aligned} \right\} \quad (13)$$

由式 (12) 利用求解条件①、②可得

$$\left. \begin{aligned} \frac{\partial u_n}{\partial r} &= \frac{y_w}{2k_h} \frac{\partial \varepsilon_v}{\partial t} \left(\frac{r_e^2}{r} - r \right) \\ \frac{\partial u_d}{\partial r} &= \frac{y_w}{2k_s} \frac{\partial \varepsilon_v}{\partial t} \left(\frac{r_s^2}{r} - r \right) \end{aligned} \right\} \quad (14)$$

对式 (14) 积分, 利用求解条件③~⑤, 可得

$$u_d = \frac{y_w}{2k_s} \frac{\partial \varepsilon_v}{\partial t} \left(r_e^2 \ln \frac{r}{r_w} - \frac{r^2 - r_w^2}{2} \right) \quad (15)$$

$$u_n = \frac{y_w}{2k_h} \frac{\partial \varepsilon_v}{\partial t} \left[\left(r_e^2 \ln \frac{r}{r_s} - \frac{r^2 - r_s^2}{2} \right) + \frac{k_h}{k_s} \left(r_e^2 \ln s - \frac{r_s^2 - r_w^2}{2} \right) \right] \quad (16)$$

式中: $s = r_s / r_w$ 。

地基土中任一深度的平均孔压为

$$\bar{u}_s = \frac{1}{\pi(r_e^2 - r_w^2)} \left(\int_{r_w}^{r_s} 2\pi r u_d dr + \int_{r_s}^{r_e} 2\pi r u_n dr \right) \quad (17)$$

将式 (15)、(16) 代入式 (18), 可得

$$\bar{u}_s = \frac{r_e^2 y_w F}{2k_h} \frac{\partial \varepsilon_v}{\partial t} \quad (18)$$

式中:

$$F = \frac{n^2}{n^2 - 1} \left[\ln n - \frac{3}{4} + \frac{4n^2 - 1}{n^4} + \left(\frac{k_h}{k_s} - 1 \right) \left(\ln s + \frac{1 - s^2}{n^2} + \frac{s^4 - 1}{4n^4} \right) \right] \quad (19)$$

设外部荷载瞬时施加, 并利用式 (6) 可得

$$\frac{\partial \varepsilon_v}{\partial t} = \frac{1}{1 + e_0} \frac{\partial \bar{e}}{\partial t} = \frac{1}{1 + e_0} \frac{\partial \bar{e}}{\partial \bar{\sigma}_{st}} \frac{\partial \bar{\sigma}_{st}}{\partial t} = -\frac{1}{1 + e_0} \frac{n^2 - 1}{n^2 - 1 + Y + \alpha} \frac{\partial \bar{e}}{\partial \bar{\sigma}_{st}} \frac{\partial \bar{u}_s}{\partial t} \quad (20)$$

将式 (20) 代入式 (18) 可得

$$\bar{u}_s = -\frac{r_e^2 y_w F}{2k_h} \frac{1}{1 + e_0} \frac{n^2 - 1}{n^2 - 1 + Y + \alpha} \frac{\partial \bar{e}}{\partial \bar{\sigma}_{st}} \frac{\partial \bar{u}_s}{\partial t} \quad (21)$$

整理式 (21) 可得

$$\bar{u}_s = -\frac{r_e^2 y_w F}{2(1 + e_0)k_{hi}} \frac{n^2 - 1}{n^2 - 1 + Y + \alpha} \frac{k_{hi}}{k_h} \frac{\partial \bar{e}}{\partial \bar{\sigma}_{st}} \frac{\partial \bar{u}_s}{\partial t} \quad (22)$$

定义径向固结时间因子为

$$T_h = \frac{c_{hi} t}{4r_e^2} = \frac{k_{hi} t}{4r_e^2 m_{vsi} y_w} = \frac{k_{hi} (1 + e_0) t}{4r_e^2 (\partial \bar{e} / \partial \bar{\sigma}_{st})_{t=0} y_w} \quad (23)$$

式中: c_{hi} 为土体的初始水平向固结系数, $c_{hi} = \frac{k_{hi} (1 + e_0)}{(\partial \bar{e} / \partial \bar{\sigma}_{st})_{t=0} y_w}$; m_{vsi} 为土体初始体积压缩系数,

$$m_{vsi} = m_{vs} \Big|_{t=0} = \frac{1}{1 + e_0} \frac{\partial \bar{e}}{\partial \bar{\sigma}_{st}} \Big|_{t=0}。$$

利用式 (23) 可得

$$\frac{\partial \bar{u}_s}{\partial t} = \frac{\partial \bar{u}_s}{\partial T_h} \frac{\partial T_h}{\partial t} = \frac{k_{hi}(1+e_0)}{4r_e^2 \gamma_w (\partial \bar{e} / \partial \bar{\sigma}_{st})} \frac{\partial \bar{u}_s}{\partial T_h} \quad (24)$$

将式(24)代入式(22)可得

$$\frac{\partial \bar{u}_s}{\partial T_h} = -\frac{8}{F} \frac{n^2 - 1 + Y + \alpha}{n^2 - 1} \frac{k_h}{k_{hi}} \frac{m_{vsi}}{m_{vs}} \bar{u}_s \quad (25)$$

对式(1)两边求导可得

$$\frac{\partial \bar{e}}{\partial \bar{\sigma}_{st}} = -\frac{C_c}{2.303 \bar{\sigma}_{st}} \quad (26)$$

$$\frac{m_{vsi}}{m_{vs}} = \frac{\partial \bar{e}}{\partial \bar{\sigma}_{st}} \bigg|_{t=0} = \frac{\bar{\sigma}_{st}}{\bar{\sigma}_{st}} \bigg|_{t=0} = \frac{\bar{\sigma}_{st}}{\bar{\sigma}_{st}} \quad (27)$$

将式(6)代入式(27)可得

$$\frac{m_{vsi}}{m_{vs}} = \frac{\bar{\sigma}_{st}}{\bar{\sigma}_{si}} = 1 + \frac{n^2}{n^2 - 1 + Y + \alpha} \frac{\sigma_0}{\bar{\sigma}_{si}} - \frac{n^2 - 1}{n^2 - 1 + Y + \alpha} \frac{\bar{u}_s}{\bar{\sigma}_{si}} \quad (28)$$

将式(28)结合式(1)、(2)可得

$$\frac{k_h}{k_{hi}} = \left(1 + \frac{n^2}{n^2 - 1 + Y + \alpha} \frac{\sigma_0}{\bar{\sigma}_{si}} - \frac{n^2 - 1}{n^2 - 1 + Y + \alpha} \frac{\bar{u}_s}{\bar{\sigma}_{si}} \right)^{-\frac{C_c}{C_k}} \quad (29)$$

结合式(27)~(29)可得

$$\frac{\partial \bar{u}_s}{\partial T_h} = -\frac{8}{F} \frac{n^2 - 1 + Y + \alpha}{n^2 - 1} A \bar{u}_s \quad (30)$$

式中:

$$A = \left(1 + \frac{n^2}{n^2 - 1 + Y + \alpha} \frac{\sigma_0}{\bar{\sigma}_{si}} - \frac{n^2 - 1}{n^2 - 1 + Y + \alpha} \frac{\bar{u}_s}{\bar{\sigma}_{si}} \right)^{1 - \frac{C_c}{C_k}} \quad (31)$$

在初始时刻, 外部荷载全部由土体内的超静孔压承担, 则有

$$t = 0, \bar{u}_s = \bar{u}_{si} = \frac{n^2}{n^2 - 1} \sigma_0 \quad (32)$$

参照文献[9]的解法, 可得

$$\bar{u}_s = \frac{n^2}{n^2 - 1} \sigma_0 e^{-\beta T_h} \quad (33)$$

式中:

$$\beta = \frac{4(n^2 - 1 + Y + \alpha)}{(n^2 - 1)F} \left[1 + \left(1 + \frac{n^2}{n^2 - 1 + Y + \alpha} \frac{\sigma_0}{\bar{\sigma}_{si}} \right)^{1 - \frac{C_c}{C_k}} \right] \quad (34)$$

结合式(15)、(16)、(18)、(33)可以得到土体扰动区和未扰动区任一点的孔压为

$$u_d = \frac{k_h \sigma_0}{k_s r_e^2 F} \frac{n^2}{n^2 - 1} e^{-\beta T_h} \left(r_e^2 \ln \left(\frac{r}{r_w} \right) - \frac{r^2 - r_w^2}{2} \right) \quad (35)$$

$$u_n = \frac{\sigma_0}{r_e^2 F} \frac{n^2}{n^2 - 1} e^{-\beta T_h} .$$

$$\left[\left(r_e^2 \ln \left(\frac{r}{r_s} - \frac{r^2 - r_s^2}{2} \right) \right) + \frac{k_h}{k_s} \left(r_e^2 \ln s - \frac{r_s^2 - r_w^2}{2} \right) \right] \quad (36)$$

即为考虑土体非线性的CCSG桩复合地基固结解析解。令 $\alpha = 0$, 即忽略混凝土芯, 则式(32)转化为考虑土体非线性的碎石桩复合地基固结解^[8]; 令 $\alpha = 0$, $Y = 1$, 则退化为Indraratna等^[7]的考虑土体非线性的砂井地基固结解。由此可见, 本文推导出的固结解析解是正确的。

4 固结度求解

4.1 按应力定义的固结度

结合式(32)和式(33), 可得按应力定义的固结度:

$$U_p = 1 - \frac{\bar{u}_s}{\bar{u}_{si}} = 1 - e^{-\beta T_h} \quad (37)$$

4.2 按变形定义的固结度

地基的固结度可按应变定义为任一时刻地基地表的固结沉降 S_t 和地表最终固结沉降 S_∞ 之比, 即

$$U_s = \frac{S_t}{S_\infty} \quad (38)$$

由式(1)、(6)和式(33)推导, 可得

$$S_t = \frac{C_c H}{1 + e_0} \lg \left(1 + \frac{n^2}{n^2 - 1 + Y + \alpha} \frac{\sigma_0}{\bar{\sigma}_{si}} - \frac{n^2}{n^2 - 1 + Y + \alpha} \frac{\sigma_0}{\bar{\sigma}_{si}} e^{-\beta T_h} \right) \quad (39)$$

$$S_\infty = \frac{C_c H}{1 + e_0} \lg \left(1 + \frac{n^2}{n^2 - 1 + Y + \alpha} \frac{\sigma_0}{\bar{\sigma}_{si}} \right) \quad (40)$$

即得到按变形定义的固结度:

$$U_s = \lg \left(1 + \frac{n^2}{n^2 - 1 + Y + \alpha} \frac{\sigma_0}{\bar{\sigma}_{si}} - \frac{n^2}{n^2 - 1 + Y + \alpha} \frac{\sigma_0}{\bar{\sigma}_{si}} e^{-\beta T_h} \right) \bigg/ \lg \left(1 + \frac{n^2}{n^2 - 1 + Y + \alpha} \frac{\sigma_0}{\bar{\sigma}_{si}} \right) \quad (41)$$

对比式(37)和式(41)可以看出, 考虑土体非

线性的 CCSG 桩复合地基按应力定义的固结度与按变形定义的固结度不相等。

5 固结性状分析

由式 (33)、(37)、(41) 可知, 考虑土体非线性的 CCSG 桩复合地基固结理论得到的两种固结度均与荷载增量($\sigma_0/\bar{\sigma}_{si}$)有关。从式 (30) 可见, 影响固结度主要有几个无量纲参数: Y 、 α ($\alpha = m^2(X-Y)$) 和 C_c/C_k , 其中, m 为混凝土桩芯大小。针对上述各无量纲参数分析考虑土体非线性的 CCSG 桩复合地基固结性状, C_c/C_k 取值介于 0.5~2.0 之间, 桩土模量比 Y 的值介于 10~20 之间。计算参数取值见表 1, 计算结果如图 2~9 所示。

表 1 计算参数取值

Table 1 Parameters used for calculation

图号	n	m	s	k_h/k_s	X	Y	C_c/C_k	$\sigma_0/\bar{\sigma}_{si}$
2	5		3	5	1 000	20	0.5	2
3	5	0.2	3	5			0.5	2
4	5	0.2	3	5			0.5	2
5	5	0.2	3	5	1 000	20		
6	5	0.2	3	5	1 000	20		
7	5	0.2	3	5	1 000	20		
8	5	0.2	3	5	1 000	20		
9	5	0.2	3	5	1 000	20		

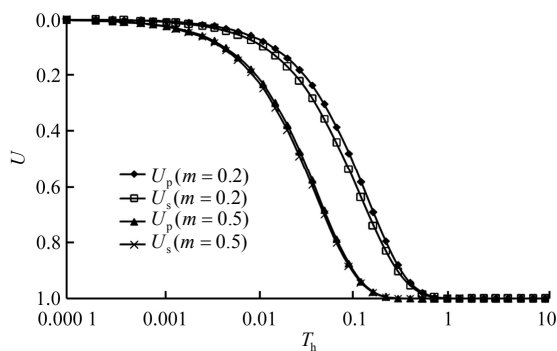


图 2 混凝土芯桩大小对固结度影响曲线

Fig.2 Influence curves of m on consolidation process

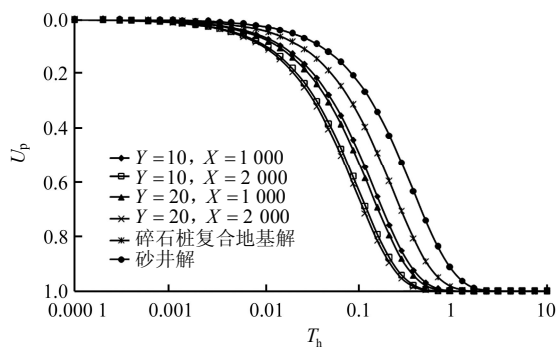


图 3 桩土模量比对地基按应力定义的固结度影响曲线

Fig.3 Influence curves of column-soil modulus ratio on consolidation process in terms of stress

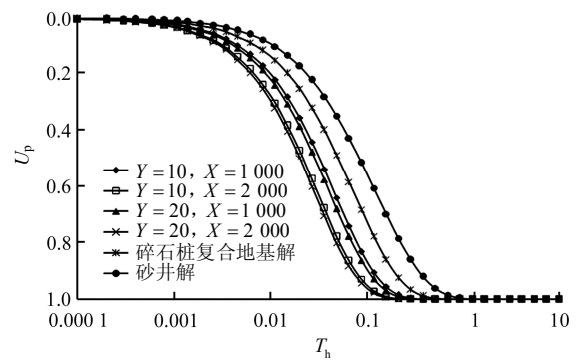


图 4 桩土模量比对地基按变形定义的固结度影响曲线

Fig.4 Influence curves of column-soil modulus ratio on consolidation process in terms of deformation

图 2 为混凝土芯桩大小 ($m=r_c/r_w$) 对考虑土体非线性的 CCSG 桩复合地基固结度影响曲线。从图中可见, m 值相等时, 按变形定义的固结度曲线位于按应力定义的固结度曲线下方, 说明按变形定义的固结速度较快; m 值不等时, 两种定义的固结速度相差较大, 且随 m 值增大, 固结速度加快。所以, 为了提高固结速度, 可适当增大桩芯大小。图 3、4 分别为桩土模量比 $Y(Y=E_w/E_s)$ 和 $X(X=E_c/E_s)$ 对固结度的影响曲线。从图中可以看出, 两种定义的固结度下, 当 X 值不变时, 随着 Y 值增大固结速度加快; 当 Y 值不变时, 随着 X 值增大固结速度加快。说明适当增大混凝土芯桩和砂石壳的刚度可以加快固结速度, 即桩体越硬, 固结越快, 这与现有的复合地基固结理论是相一致的。图中的碎石桩复合地基解^[8]是当式 (33) 中 $X=1$, $m=0$ 时的情况。可见, 考虑土体非线性的 CCSG 桩复合地基固结速度要快于普通碎石桩复合地基的固结速度。图中的砂井解^[7]是当式 (33) 中 $X=1$, $Y=1$, $m=0$ 时的情况。可见, 考虑土体非线性和应力集中效应的 CCSG 桩复合地基和碎石桩复合地基的固结速度总是快于砂井地基。

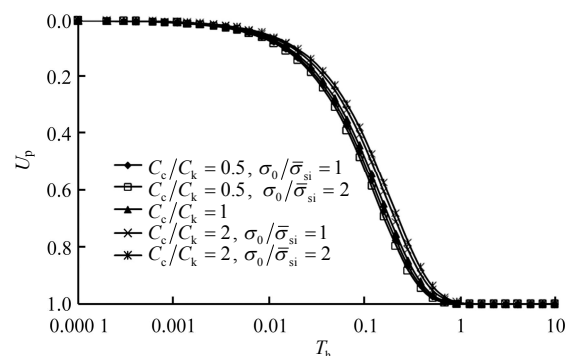


图 5 不同参数变化情况下地基按应力定义的固结度

Fig.5 Curves of consolidation process in terms of stress by variation of different parameters

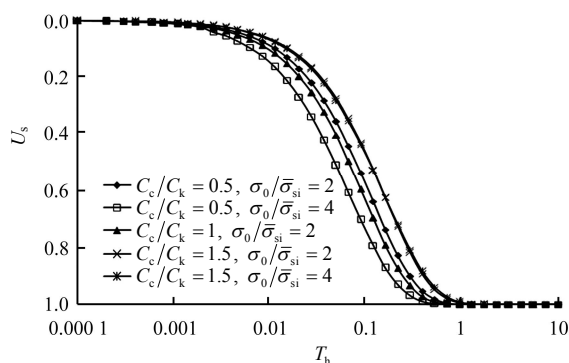


图 6 不同参数变化情况下地基按变形定义的固结度
Fig.6 Curves of consolidation process in terms of deformation by variation of different parameters

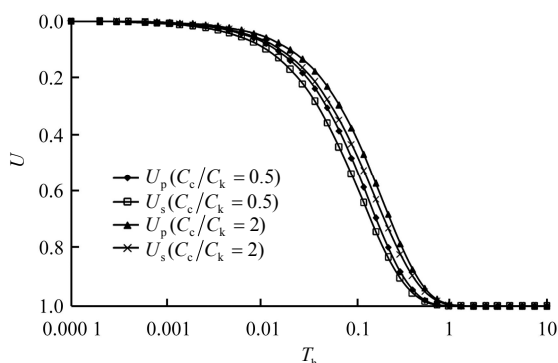


图 7 不同 C_c/C_k 时两种固结度变化曲线
Fig.7 Curves between two types of consolidation rate at different values of C_c/C_k

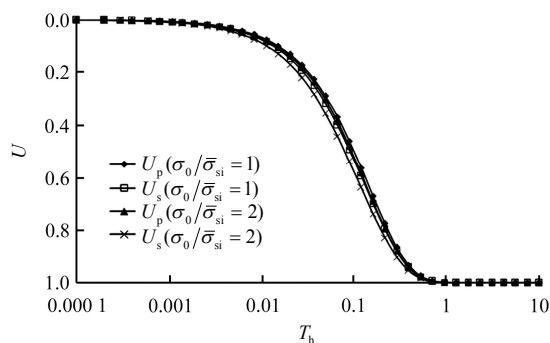


图 8 不同 $\sigma_0/\bar{\sigma}_{si}$ 时两种固结度变化曲线
Fig.8 Curves between two types of consolidation rate at different values of $\sigma_0/\bar{\sigma}_{si}$

从图 5、6 C_c/C_k 和 $\sigma_0/\bar{\sigma}_{si}$ 对考虑土体非线性的 CCSG 桩复合地基按应力和变形定义的固结度影响曲线可以看出, 按应力定义的情况下, 当 $C_c/C_k < 1$ 时, 考虑土体非线性的固结速度比不考虑土体非线性 (即 $C_c/C_k = 1$) 的固结速度快, 当 $C_c/C_k > 1$ 时, 情况相反; 另外, 当 $C_c/C_k < 1$ 时, 地基固结速度随着附加应力的增大而加快, 当 $C_c/C_k > 1$ 时, 地基固结速度随着附加应力的增大而减慢; 在按变形定义的情况下, $\sigma_0/\bar{\sigma}_{si}$ 值相等时, 无论 C_c/C_k 取何值, 考虑土体非线性的固结速度均比不考虑土体非线性

(即 $C_c/C_k = 1$) 的固结速度慢, 且地基固结速度均随着附加应力的增大而加快。

从图 7 不同 C_c/C_k 值时两种定义固结度的变化曲线可以看出, 同一种定义固结度下, C_c/C_k 的值越大, 固结速度越慢; C_c/C_k 的值相同时, 按变形定义的固结速度快于按应力定义的固结速度。图 8 为不同 $\sigma_0/\bar{\sigma}_{si}$ 值对两种定义固结度的影响曲线图。由图可见, 同一种定义的固结度下, 固结速度随着 $\sigma_0/\bar{\sigma}_{si}$ 值的增大而加快, 即荷载增量越大, 固结越快; $\sigma_0/\bar{\sigma}_{si}$ 的值相同时, 按变形定义的固结速度快于按应力定义的固结速度。上述规律与考虑土体非线性的碎石桩复合地基的固结规律是相似的。

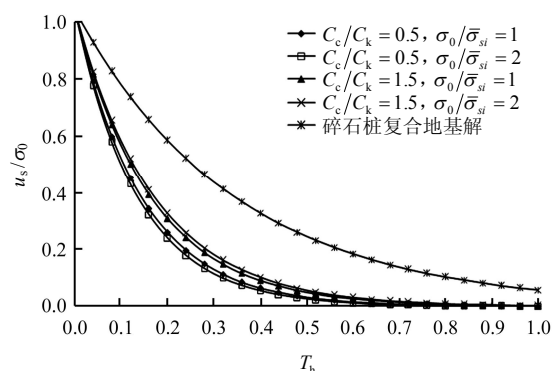


图 9 不同参数变化下土体内平均孔压消散曲线
Fig.9 Curves of dissipation of average pore water pressure with time

从图 9 不同参数变化时的地基土体内平均孔压消散曲线可以看出, 土体内的平均孔压在初始时刻大于土体内的平均附加压力; C_c/C_k 的值不变时, 土体内平均孔压消散速度随着 $\sigma_0/\bar{\sigma}_{si}$ 值的增大而加快, 即荷载增量越大, 孔压消散越快, 固结越快; $\sigma_0/\bar{\sigma}_{si}$ 不变时, 土体内平均孔压消散速度随着 C_c/C_k 值的增大而变慢; 地基前期土体内平均孔压消散较快, 后期较慢; 另外, 考虑土体非线性的 CCSG 桩复合地基土体内平均孔压消散速度要快于碎石桩复合地基, 即 CCSG 桩复合地基固结较快。

6 工程应用

采用溧阳某高速公路软基处理工程 CCSG 桩复合地基试验段资料^[9], 用 Asaoka 法由实测沉降数据预测 CCSG 桩复合地基的最终沉降量, 并由实测沉降值与最终沉降量的比值绘制固结度随时间增长曲线, 另采用改进的太沙基法对由理论公式获得的固结度作修正以满足实际工程中荷载分级施加情况, 最后对比两种方法获得的固结度随时间增长曲线, 如图 10 所示, 场地计算参数取值见表 2。

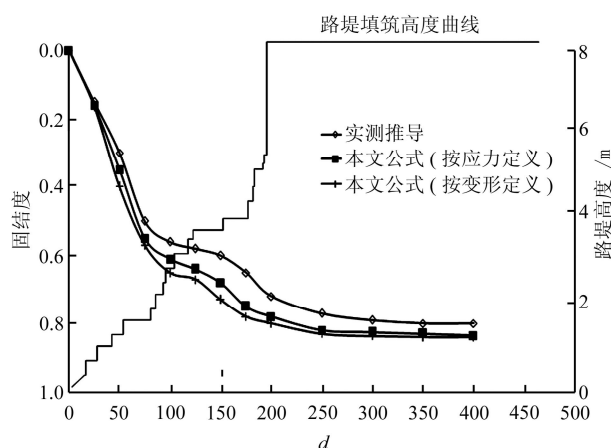


图 10 固结度随时间增长曲线
Fig.10 Variation of consolidation degree of the composite foundation with time

表 2 场地计算参数
Table 2 Calculation parameters of soil

d_c/m	d_w/m	s	n	k_s/k_h	C_c/C_k	σ_0/σ_{si}	m
2.21	0.5	2	10	0.2	0.5	2	0.2

从图 10 中可以看出,计算得到的固结度曲线与由实测数据获得的固结度曲线吻合较好。两种固结度定义下的固结速度均比实测固结速度略快,原因是(1)因为本文公式基本假定砂石壳内无井阻,即增大了砂石壳的排水能力;(2)因为现场试验段在各级加载完成后存在沉降滞后现象,表现为由实测数据获得的固结度增长有一定滞后现象。

7 结 论

(1) 考虑土体非线性的砂井地基固结解^[7]是本文解在 $Y=1$, $X=1$, $m=0$ 时的特例,考虑土体非线性的碎石桩复合地基固结解^[8]是本文解在 $X=1$, $m=0$ 时的特例,CCSG 桩复合地基的固结速度快于碎石桩复合地基和砂井地基的固结速度。

(2) 考虑土体非线性的 CCSG 桩复合地基,按变形定义得到的固结度大于按应力定义固结度,与碎石桩复合地基在考虑土体非线性时的规律相同。按应力定义情况下: $C_c/C_k < 1$ 时,固结速度随附加应力增大而加快; $C_c/C_k > 1$ 时,固结速度随附加应力增大而减慢。按变形定义情况下,无论 C_c/C_k 取何值,固结速度均随附加应力增大而加快。

(3) 按应力定义情况下,当 $C_c/C_k < 1$ 时,不考虑土体非线性会低估地基固结速度;当 $C_c/C_k > 1$ 时,不考虑土体非线性会高估地基固结速度。按变形定义的情况下无论 C_c/C_k 取何值,考虑土体非线性会低估地基固结速度。

参 考 文 献

[1] 陈俊生,唐彤芝,赵维炳,等. 混凝土芯砂石桩复合地基现场试验研究[J]. 岩土工程学报, 2007, 29(7): 957—

962.

CGEN Jun-sheng, TANG Tong-zhi, ZHAO Wei-bing, et al. Field tests on composite foundation with concrete-cored sand-gravel piles[J]. **Chinese Journal of Geotechnical Engineering**, 2007, 29(7): 957—962.

[2] 蔡新,谢康和,徐妍,等. 初始孔压非均匀条件下涂抹区渗透系数变化的砂井地基固结解[J]. 岩土工程学报, 2010, 32(1): 104—108.

CAI Xin, XIE Kang-he, XU Yan, et al. Analytical solution for consolidation of sand-drained ground under non-uniform distribution of initial excess pore water pressure and variation of permeability coefficient in smear zone[J]. **Chinese Journal of Geotechnical Engineering**, 2010, 32(1): 104—108.

[3] 王瑞春,谢康和. 考虑应力集中效应的散体材料桩复合地基固结解析分析[J]. 科技通报, 2001, 17(5): 26—31.

WANG Rui-chun, XIE Kang-he. Analytical solution for consolidation of composite ground with granular columns considering stress concentration effects[J]. **Bulletin of Science and Technology**, 2001, 17(5): 26—31.

[4] 张玉国,边亚东,潘洪科,等. 水平向渗透系数变化条件下散体材料桩复合地基固结理论分析及研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2008, 27(8): 1715—1721.

ZHANG Yu-guo, BIAN Ya-dong, PAN Hong-ke, et al. Research and analysis of composite ground consolidation with granular columns under arbitrary variation of horizontal permeability coefficient[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2008, 27(8): 1715—1721.

[5] 王瑞春,谢康和,关山海. 变化荷载下散体材料桩复合地基固结解析解[J]. 浙江大学学报(工学版), 2002, 36(1): 12—16.

WANG Rui-chun, XIE Kang-he, GUAN Shan-hai. Analytical solutions for consolidation of composite ground with granular columns under time-dependent loading[J]. **Journal of Zhejiang University(Engineering Science)**, 2002, 36(1): 12—16.

[6] LEKHA K R, KRISHNASWAMY N R, BASAK P. Consolidation of clays for variable permeability and compressibility[J]. **Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, ASCE**, 2003, 129(11): 1001—1009.

[7] INDRARATNA B, RUJIKIATKAMJORN C, SATHANANTHANL. Radial consolidation of clay using compressibility indices and varying horizontal permeability[J]. **Canadian Geotechnical Journal**, 2005, 42(5): 1330—1341.

[8] 卢萌盟,谢康和,王玉林,等. 碎石桩复合地基非线性固结解析解[J]. 岩土力学, 2010, 31(6): 1833—1840.

LU Meng-meng, XIE Kang-he, WANG Yu-lin, et al. Analytical solution for nonlinear consolidation of stone column reinforced composite ground[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2010, 31(6): 1833—1840.

[9] 俞绍,戚志博,蔡燕燕,等. 低标号混凝土芯砂石桩复合地基固结一般解[J]. 工程力学, 2013, 30(11): 127—135.

YU Jin, QI Zhi-bo, CAI Yan-yan, et al. General solution for consolidation of low-grade concrete-cored sand-gravel pile composite foundation[J]. **Journal of Engineering Mechanics**, 2013, 30(11): 127—135.