

DOI: 10.11779/CJGE201712007

多元不排水长短桩复合地基固结解析解

杨 涛¹, 李 超¹, 阮一舟²

(1. 上海理工大学土木工程系, 上海 200093; 2. 中国建筑上海设计研究院有限公司, 上海 266044)

摘要: 多元复合地基是一种新型的复合地基技术。推导出瞬时加荷条件下多元不排水长短桩复合地基桩间土的固结方程, 基于双层地基一维固结理论建立了相应的固结解析解。通过与有限元解的比较验证了解析解的正确性。利用建立的固结解析解进行参数分析, 研究了多元不排水桩长短桩复合地基的固结特性。计算结果表明, 多元不排水长短桩复合地基的固结速率随长桩压缩模量和置换率的增加而增大。短桩压缩模量和置换的变化对复合地基固结速率的影响很小。短桩较短时, 短桩长度的变化对复合地基固结速率几乎没有影响, 短桩较长时, 复合地基固结速率随短桩长度的增加而增大。此外, 多元不排水长短桩复合地基的固结速率随短桩以下土体压缩模量的增加而增大。

关键词: 多元不排水长短桩; 复合地基; 解析解; 固结; 有限元

中图分类号: TU473 文献标识码: A 文章编号: 1000-4548(2017)12-2195-08

作者简介: 杨 涛(1962-), 男, 教授, 主要从事地基加固技术与理论研究。E-mail: shyangtao@163.com。

Analytical solution for consolidation of a composite ground with impervious multi-long-short piles

YANG Tao¹, LI Chao¹, RUAN Yi-zhou²

(1. Department of Civil Engineering, University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai 200093, China; 2. China Shanghai

Architectural Design and Research Institute Co., Ltd., Shanghai 266044, China)

Abstract: The impervious multi-long-short piles-reinforced ground is a new type of composite ground technology. The equations governing the consolidation of the surrounding soils within the composite ground are derived under instantaneous load. The analytical solutions are then developed for the consolidation of the composite ground based on the one-dimensional consolidation theory of a double-layer ground. The comparison of the consolidation rates from the proposed analytical solution with the FEM is made to verify the correctness and accuracy of the proposed analytical solutions. Parametric study is conducted to investigate the consolidation behavior of this new type of composite ground using the proposed analytical solutions. The results show that the consolidation rate of the composite ground with impervious multi-long-short piles increases with the increase of the area replacement ratio and the constrained modulus of the long piles. The area replacement ratio and the constrained modulus of the short piles have insignificant influences on the consolidation rate of the composite ground. When the short piles have shorter lengths, the variation of the length of the short piles has little influences on the consolidation rate of the composite ground. The consolidation rate increases with the increase of the length of the short piles when the short piles are long enough. Furthermore, it increases with the increase of the constrained modulus of the soil bellow the tip of the short piles.

Key words: impervious multi-long-short pile; composite ground; analytical solution; consolidation; FEM

0 引言

根据桩体的透水性能, 复合地基分为排水桩复合地基和不排水桩复合地基。散体材料桩复合地基为排水桩复合地基, 水泥土桩、CFG 桩等黏结材料桩复合地基则为不排水桩复合地基。

复合地基固结理论是复合地基理论的重要组成部分。以砂井地基固结理论为基础, 散体材料桩复合地基固结理论的研究取得了很大进展, 建立的固结解析解^[1-10]可以考虑涂抹和井阻效应、桩周土水平向渗透

系数沿径向变化、桩体径向和竖向组合渗流、变荷载作用、附加应力沿地基深度线性变化、桩体固结和侧向变形、固结非线性以及软土未打穿等复杂因素的影响。

不排水桩复合地基承载力高, 控制沉降效果好, 目前在世界各国都得到了广泛应用, 其固结问题已

基金项目: 广东省交通科技项目(201102021); 上海理工大学国家级项目培育基金项目(16HJPY-MS03)

收稿日期: 2016-09-18

受到国内外学者关注。杨涛等^[11-12]和 Miao 等^[13]采用复合模量法, 分别给出瞬时和分级加载情况下端承和悬浮不排水桩复合地基固结解析解。考虑到不排水桩复合地基中桩体并不固结, 卢萌盟等^[14]和 Yang 等^[15]分别推导出不排水桩复合地基桩间土和下卧层土的固结方程, 建立了瞬时和分级加载情况下端承和悬浮不排水桩复合地基固结解析解。

由不同材料桩组成的多元复合地基融合了各桩型的优点, 可以节约工程造价。因此, 近十余年来多元复合地基在中国得到了大量应用。一些学者^[16-20]通过现场和室内试验等方法研究了多元复合地基的承载特性, 闫明礼等^[21]和郑俊杰等^[22]建立了多元复合地基承载力和沉降的计算方法。

目前提出的复合地基固结解析算法都是针对单一材料桩复合地基建立的, 不适合分析多元复合地基的固结问题。多元复合地基固结计算理论尚未有研究成果报道。有鉴于此, 本文推导多元不排水长短桩复合地基的固结方程并建立相应的固结解析解, 通过固结度解析解与有限元解的比较验证解析解的正确性。最后, 利用建立的固结解析解进行参数分析, 研究多元不排水长短桩复合地基固结特性。

1 计算模型与基本假定

1.1 计算模型

在多元不排水长短桩复合地基中选取典型单元体 (unit cell) 作为固结模型进行固结分析, 如图 1 所示。A 和 B 分别代表长桩和短桩。长、短桩均正方形布置, 间距均为 s , 长桩打穿软土层。

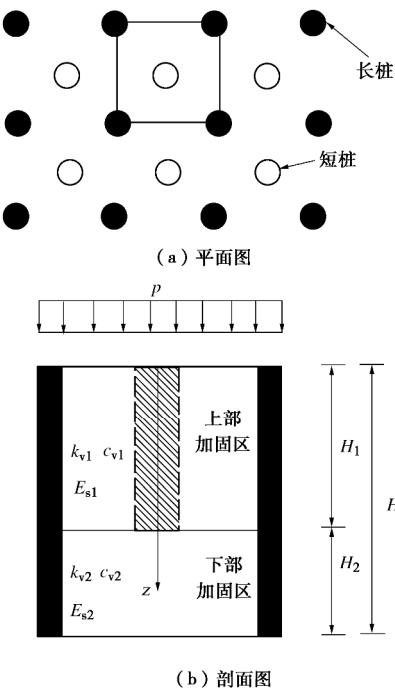


图 1 多元复合地基固结模型

Fig. 1 Consolidation model for multi-pile composite ground

根据短桩长度将复合地基加固区分为上、下两部分。上、下部加固区厚度分别 H_1 和 H_2 。 k_{v1} , E_{s1} 和 c_{v1} 分别为上部加固区桩间土的竖向渗透系数、压缩模量和竖向固结系数, k_{v2} , E_{s2} 和 c_{v2} 分别为下部加固区桩间土的竖向渗透系数、压缩模量和竖向固结系数。复合地基表面作用荷载为 p 。

1.2 计算假定

为建立多元不排水长短桩复合地基固结解析解, 本文采用如下基本假定:

- (1) 土体处于完全饱和状态, 仅发生竖向渗流, 土体中水的流动符合 Darcy 定律。
- (2) 长、短桩都为不排水桩, 内部不产生超静孔隙水压力。
- (3) 等应变条件成立。即任意深度内桩和土的竖向变形相等。
- (4) 固结过程中土体渗透系数、压缩模量等物理力学参数保持不变。
- (5) 荷载均匀且瞬时施加, 固结过程中保持不变。

2 桩间土的固结方程

2.1 上部加固区固结方程

在上部加固区任意深度处, 由竖向力的平衡条件有

$$(1 - m_1 - m_2) \bar{s}_{s1} + m_1 \bar{s}_{p1} + m_2 \bar{s}_{p2} = p , \quad (1)$$

式中, m_1 和 m_2 分别为长、短桩的置换率, \bar{s}_{s1} , \bar{s}_{p1} 和 \bar{s}_{p2} 分别为上部加固区任意深度处桩间土、长桩和短桩的竖向平均总应力。

由等应变假定有

$$\frac{\bar{s}_{s1} - \bar{u}_{s1}}{E_{s1}} = \frac{\bar{s}_{p1}}{E_{p1}} = \frac{\bar{s}_{p2}}{E_{p2}} = e_v , \quad (2)$$

式中, E_{p1} 和 E_{p2} 分别为长、短桩的压缩模量, \bar{u}_{s1} 为上部加固区土体内任意深度处的平均超静孔隙水压力, e_v 为复合地基任意深度处的竖向应变。

由式 (1)、(2) 有

$$e_v = \frac{p - (1 - m_1 - m_2) \bar{u}_{s1}}{E_{comp1}} , \quad (3)$$

$$E_{comp1} = m_1 E_{p1} + m_2 E_{p2} + (1 - m_1 - m_2) E_{s1} , \quad (4)$$

式中, E_{comp1} 为上部加固区的复合压缩模量。

利用式 (3) 得到竖向应变关于时间的偏导数:

$$\frac{\partial e_v}{\partial t} = - \frac{(1 - m_1 - m_2)}{E_{comp1}} \frac{\partial \bar{u}_{s1}}{\partial t} . \quad (5)$$

由于桩为不排水桩, 桩间土中的孔隙水仅会竖向流动。由质量守恒定律有

$$\frac{\partial e_v}{\partial t} = - \frac{k_{v1}}{g_w} \frac{\partial^2 \bar{u}_{s1}}{\partial z^2} , \quad (6)$$

式中, g_w 为水的重度。

将式(5)带入式(6)得

$$\frac{\partial \bar{u}_{s1}}{\partial t} = \frac{E_{comp1} k_{v1}}{(1-m_1-m_2)g_w} \frac{\partial^2 \bar{u}_{s1}}{\partial z^2} = c_{v1e} \frac{\partial^2 \bar{u}_{s1}}{\partial z^2} , \quad (7)$$

$$c_{v1e} = \frac{E_{comp1} k_{v1}}{(1-m_1-m_2)g_w} = \left[1 + \frac{m_1 E_{p1} + m_2 E_{p2}}{(1-m_1-m_2)E_{s1}} \right] c_{v1} , \quad (8)$$

式中, $c_{v1} = E_{s1} k_{v1} / g_w$ 。 c_{v1e} 为考虑长、短桩影响后桩间土的等效竖向固结系数。

式(7)即为上部加固区桩间土的固结控制方程。

2.2 下部加固区固结方程

在下部加固区任意深度处, 由竖向力的平衡有

$$(1-m_1) \bar{S}_{s2} + m_1 \bar{S}_{p1} = p , \quad (9)$$

式中, \bar{S}_{s2} 为下部加固区任意深度处桩间土的竖向平均总应力。

由等应变假设得

$$\frac{\bar{S}_{s2} - \bar{u}_{s2}}{E_{s2}} = \frac{\bar{S}_{p1}}{E_{p1}} = e_v , \quad (10)$$

式中, \bar{u}_{s2} 为下部加固区任意深度处桩间土的平均超静孔隙水压力。

由式(9)、(10)可得

$$e_v = \frac{p - (1-m_1)\bar{u}_{s2}}{E_{comp2}} , \quad (11)$$

$$E_{comp2} = m_1 E_{p1} + (1-m_1)E_{s2} , \quad (12)$$

式中, E_{comp2} 为下部加固区的复合压缩模量。

由式(11)可得

$$\frac{\partial e_v}{\partial t} = -\frac{(1-m_1)}{E_{comp2}} \frac{\partial \bar{u}_{s2}}{\partial t} . \quad (13)$$

由质量守恒定律有

$$\frac{\partial e_v}{\partial t} = -\frac{k_{v2}}{g_w} \frac{\partial^2 \bar{u}_{s2}}{\partial z^2} . \quad (14)$$

将式(13)代入式(14)可得

$$\frac{\partial \bar{u}_{s2}}{\partial t} = \frac{E_{comp2} k_{v2}}{(1-m_1)g_w} \frac{\partial^2 \bar{u}_{s2}}{\partial z^2} = c_{v2e} \frac{\partial^2 \bar{u}_{s2}}{\partial z^2} , \quad (15)$$

$$c_{v2e} = \frac{E_{comp2} k_{v2}}{(1-m_1)g_w} = \left[1 + \frac{m_1 E_{p1}}{(1-m_1)E_{s2}} \right] c_{v2} , \quad (16)$$

式中, c_{v2e} 为考虑长桩影响后下部加固区桩间土的等效竖向固结系数, $c_{v2} = E_{s2} k_{v2} / g_w$ 。

式(15)即为下部加固区桩间土的固结控制方程。

3 求解条件与固结解析解

3.1 求解条件

(1) 边界条件

考虑单面排水, 即复合地基顶面排水底面不排水, 则边界条件如下:

$$z=0: \bar{u}_{s1}(z,t)=0 , \quad (17)$$

$$z=H: \frac{\partial \bar{u}_{s2}(z,t)}{\partial z}=0 . \quad (18)$$

(2) 上、下加固区分界面连续性条件

将式(1)、(9)用有效应力表示, 在上、下加固区分界面上有

$$\begin{aligned} z=H_1: (1-m_1-m_2)(\bar{S}_{s1} - \bar{u}_{s1}) + m_1 \bar{S}_{p1} + m_2 \bar{S}_{p2} \\ = (1-m_1)(\bar{S}_{s2} - \bar{u}_{s2}) + m_1 \bar{S}_{p1} . \end{aligned} \quad (19)$$

由式(1)、(9)、(19), 可得分界面孔压连续性条件如下:

$$z=H_1: (1-m_1-m_2)\bar{u}_{s1} = (1-m_1)\bar{u}_{s2} . \quad (20)$$

分界面渗流连续性条件为

$$z=H_1: (1-m_1-m_2)k_{v1} \frac{\partial \bar{u}_{s1}}{\partial z} = (1-m_1)k_{v2} \frac{\partial \bar{u}_{s2}}{\partial z} . \quad (21)$$

(3) 初始条件

由式(3)、(11)可得初始条件为

$$t=0: \begin{cases} \bar{u}_{s1} = \frac{p}{1-m_1-m_2} \\ \bar{u}_{s2} = \frac{p}{1-m_1} \end{cases} . \quad (22)$$

3.2 方程与求解条件的变换

为便于固结方程在上述求解条件下求解, 引入如下函数变换:

$$\hat{u}_{s1} = (1-m_1-m_2)\bar{u}_{s1} , \quad (23)$$

$$\hat{u}_{s2} = (1-m_1)\bar{u}_{s2} . \quad (24)$$

显然, \hat{u}_{s1} 和 \hat{u}_{s2} 分别是复合地基上、下加固区任意深度处的平均孔压。

将式(23)、(24)代入式(7)、(15), 得到变换后的固结控制方程组:

$$\left. \begin{aligned} \frac{\partial \hat{u}_{s1}}{\partial t} &= c_{v1e} \frac{\partial^2 \hat{u}_{s1}}{\partial z^2} , \\ \frac{\partial \hat{u}_{s2}}{\partial t} &= c_{v2e} \frac{\partial^2 \hat{u}_{s2}}{\partial z^2} . \end{aligned} \right\} \quad (25)$$

将式(23)、(24)代入式(17)、(18)、(20)~(22), 得到变换后的求解条件:

$$z=0: \hat{u}_{s1}(z,t)=0 , \quad (26)$$

$$z=H: \frac{\partial \hat{u}_{s2}(z,t)}{\partial z}=0 , \quad (27)$$

$$z=H_1: \hat{u}_{s1} = \hat{u}_{s2}, k_{v1} \frac{\partial \hat{u}_{s1}}{\partial z} = k_{v2} \frac{\partial \hat{u}_{s2}}{\partial z} , \quad (28)$$

$$t=0: \hat{u}_{s1} = \hat{u}_{s2} = p . \quad (29)$$

3.3 固结解析解

从固结方程式(25)和求解条件式(26)~(29)可以发现, 除了固结控制方程中的固结系数被 c_{v1e} 和 c_{v2e} 代替外, 变换后的固结方程和求解条件与谢康和^[23]瞬时加载作用下双层地基的控制方程和求解条件是相

同的, 这样, 多元不排水长短桩复合地基的固结问题就可以转化表面受荷载 p 作用, 上、下层固结系数分别为 c_{v1e} 和 c_{v2e} 的双层地基的固结问题了。

定义如下 4 个无量纲的量:

$$\left. \begin{aligned} a &= \frac{k_{v2}}{k_{v1}}, \\ b &= \frac{E_{\text{comp1}}(1-m_1)}{(1-m_1-m_2)E_{\text{comp2}}}, \\ c &= \frac{H_2}{H_1}, \\ m &= \sqrt{\frac{b}{a}}. \end{aligned} \right\} \quad (30)$$

基于谢康和^[23]双层地基一维固结理论, 很容易得到 \hat{u}_{s1} 和 \hat{u}_{s2} 如下:

$$\hat{u}_{s1}(z, t) = p \sum_{n=1}^{\infty} C_n \sin\left(I_n \frac{z}{H_1}\right) e^{-I_n^2 T_v}, \quad (31)$$

$$\hat{u}_{s2}(z, t) = p \sum_{n=1}^{\infty} \frac{C_n \sin(I_n)}{\cos(mcI_n)} \cos\left(ml_n \frac{H-z}{H_1}\right) e^{-I_n^2 T_v}, \quad (32)$$

$$\left. \begin{aligned} C_n &= \frac{2 \cos^2(mcI_n)}{I_n [\cos^2(mcI_n) + bc \sin^2(I_n)]}, \\ T_v &= c_{v1e} t / H_1^2. \end{aligned} \right\} \quad (33)$$

I_n 为以下特征方程的根:

$$\sqrt{ab} \tan(I_n) \tan(mcI_n) = 1. \quad (34)$$

利用式 (23)、(24) 即可得到上、下加固区桩间土的平均超静孔隙水压力:

$$\bar{u}_{s1}(z, t) = \frac{p}{1-m_1-m_2} \sum_{n=1}^{\infty} C_n \sin\left(I_n \frac{z}{H_1}\right) e^{-I_n^2 T_v}, \quad (35)$$

$$\bar{u}_{s2}(z, t) = \frac{p}{1-m_1} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{C_n \sin(I_n)}{\cos(mcI_n)} \cos\left(ml_n \frac{H-z}{H_1}\right) e^{-I_n^2 T_v}. \quad (36)$$

由于 \hat{u}_{s1} 和 \hat{u}_{s2} 分别是复合地基上、下加固区任意深度处的平均孔压, 则多元不排水长短桩复合地基按沉降定义的固结度 U_s 和按孔压定义的固结度 U_p 按下式计算^[23]:

$$U_s = 1 - \frac{\frac{1}{H_1} \int_0^{H_1} \hat{u}_{s1}(z, t) dz + \frac{bc}{H_2} \int_{H_1}^H \hat{u}_{s2}(z, t) dz}{\frac{1}{H_1} \int_0^{H_1} \hat{u}_{s1}(z, 0) dz + \frac{bc}{H_2} \int_{H_1}^H \hat{u}_{s2}(z, 0) dz}, \quad (37)$$

$$U_p = 1 - \frac{\frac{1}{H_1} \int_0^{H_1} \hat{u}_{s1}(z, t) dz + \frac{c}{H_2} \int_{H_1}^H \hat{u}_{s2}(z, t) dz}{\frac{1}{H_1} \int_0^{H_1} \hat{u}_{s1}(z, 0) dz + \frac{c}{H_2} \int_{H_1}^H \hat{u}_{s2}(z, 0) dz}. \quad (38)$$

将式 (29)、(31)、(32) 代入式 (37)、(38) 可以得到

$$U_s = 1 - \sum_{n=1}^{\infty} \frac{C_n}{I_n(1+bc)} e^{-I_n^2 T_v}, \quad (39)$$

$$U_p = 1 - \sum_{n=1}^{\infty} \frac{C_n [b + (1-b) \cos(I_n)]}{I_n b (1+c)} e^{-I_n^2 T_v}. \quad (40)$$

如果 $m_1=m_2=0$, $E_{s1}=E_{s2}=E_s$, $k_{v1}=k_{v2}=k_v$, 则多元不排水长短桩复合地基变为单层均质天然地基。此时, $H_1=H$, 特征值 $I_n=(2n-1)\pi/2=M$, $C_n=2/M$, 故固结度解答式 (39)、(40) 变为

$$U_s = U_p = 1 - \sum_{n=1}^{\infty} \frac{2}{M} e^{-M^2 T_v}, \quad (41)$$

$$\left. \begin{aligned} T_v &= \frac{c_v t}{H^2}, \\ c_v &= \frac{k_v E_s}{g_w}. \end{aligned} \right\} \quad (42)$$

式 (41) 为太沙基一维固结解答。这样, 多元不排水长短桩复合地基固结解析解就退化为太沙基解答。

4 算例验证

复合地基厚度 $H=20$ m, 长、短桩直径均为 0.4 m, 短桩长度 14 m, 长、短桩均正方形布设, 间距都为 1.2 m。地基土、长、短桩的压缩模量、泊松比和渗透系数见表 1 所示。

表 1 材料模型参数

Table 1 Model parameters of materials

| 类别 | 压缩模量/MPa | 泊松比 | 渗透系数/(m·s ⁻¹) |
|-----|----------|------|---------------------------|
| 长桩 | 500 | 0.20 | — |
| 短桩 | 100 | 0.25 | — |
| 地基土 | 3.0 | 0.35 | 10^{-8} |

为研究解析解对刚、柔性基础下多元不排水长短桩复合地基固结分析的适用性, 考虑复合地基表面有、无 0.4 m 厚混凝土板二种情况进行有限元分析。混凝土板模拟刚性基础, 无混凝土板模拟柔性基础。混凝土板的弹性模量为 21 GPa, 泊松比为 0.16。按图 1 选择典型单元体作为有限元分析模型。考虑基础板时模型尺寸为 1.2 m×1.2 m×20.4 m。模型底边界水平与竖直方向位移全约束, 不排水。4 个竖直边界都是对称面, 故约束其法线方向位移, 不排水。复合地基表面为自由边界, 排水。均布荷载 $p=68$ kPa 瞬时施加。有限元分析中将圆形截面桩按面积相等原则转换为方形截面桩, 图 2 给出刚性基础下复合地基有限元分析网格, 模型采用 8 节点六面体单元 (C3D8P) 离散, 单元数 3280, 结点数 4158 个。

采用 ABAQUS 有限元软件进行算例有限元分析。桩、地基土和混凝土板采用线弹性模型, 桩和地基土

的弹性模量 E 可根据其压缩模量 E_1 和泊松比 n 按式 $E=(1+n)(1-2n)E_1/(1-n)$ 近似估算^[24]。

图 3 给出解析解与有、无基础板情况下有限元法获得的复合地基平均固结度 U_s 随时间因数 $T_u=c_{v1}t/H^2$ 变化曲线的比较。图 3 表明, 固结度解析解较之刚性基础下复合地基有限元解数值略大, 二者之差的绝对值最大不超过 5.5%; 解析解较之柔性基础下复合地基有限元解数值略小, 二者之差的绝对值最大不超过 7.7%。算例表明, 由于采用了等应变假设, 本文固结解析解更适合刚性基础下多元不排水长短桩复合地基的固结分析, 解析解具有足够的计算精度。

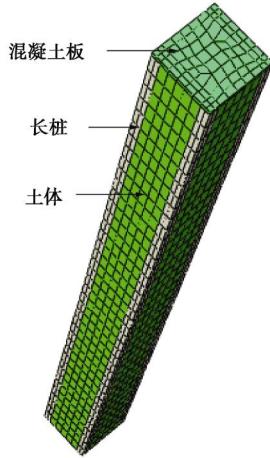


图 2 有限元网格

Fig. 2 Finite element mesh

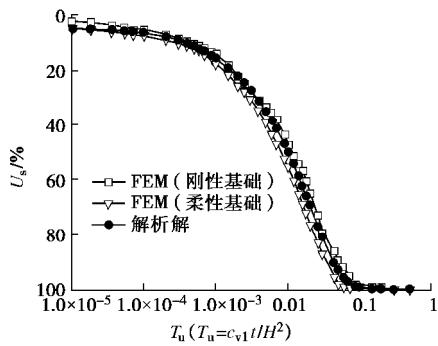


图 3 解析解与有限元解的比较

Fig. 3 Comparison between analytical and FEM results

5 固结性状分析

复合地基厚度 $H=20$ m。作为比较的基准, 桩间土压缩模量 $E_{s1}=E_{s2}=3$ MPa。短桩长度 $H_1=14$ m, 长、短桩置换率 $m_1=m_2=0.09$, 其压缩模量分别为 $E_{p1}=1000$ MPa 和 $E_{p2}=100$ MPa。

(1) 长桩参数的影响

图 4 给出多元不排水长短桩复合地基固结速率随长、短桩压缩模量比 E_{p1}/E_{p2} 变化曲线, 短桩模量

$E_{p2}=100$ MPa。图 4 清楚地表明, 长桩压缩模量的变化对复合地基固结速率的影响很大。复合地基固结速率随长桩压缩模量的增加而显著增大, 但固结速率的增加率逐渐减少。

长桩置换率 m_1 的变化对多元不排水长短桩复合地基固结速率的影响见图 5 所示。图 5 表明, 复合地基的固结速率受长桩置换率的影响较大, 长桩的置换率越大, 复合地基固结越快, 但固结速率增加率逐渐减少。

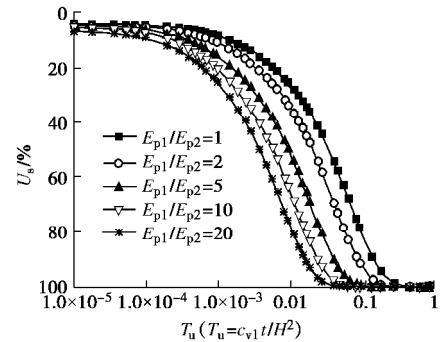


图 4 E_{p1}/E_{p2} 对复合地基固结速率的影响

Fig. 4 Influence of E_{p1}/E_{p2} on consolidation rate

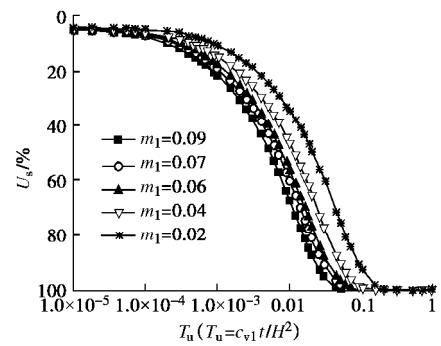


图 5 m_1 对复合地基固结速率的影响

Fig. 5 Influence of m_1 on consolidation rate

(2) 短桩参数的影响

图 6 给出不同短桩长度 H_1 下多元不排水长短桩复合地基的固结度曲线。从图 6 中可见, 短桩长度较小时 (如 $H_1<12$ m), 复合地基的固结速率几乎不随短桩长度的增加而变化。短桩长度超过 12 m 以后, 复合地基固结速率随短桩长度的增加而逐渐变大, 但增幅较小。如固结 15d 时, 短桩长度从 6 m 增加到 19 m, 复合地基的固结度从 64.4% 增加到 73.3%, 短桩增长增加了 2.2 倍, 而固结度数值仅仅增加了 0.14 倍。

图 7 给出不同短桩长度情况下短桩压缩模量 E_{p2} 的变化对多元不排水长短桩复合地基固结速率的影响。从图 7 中可以看出, 短桩较短时, 随着短桩压缩模量的增加, 复合地基的固结速率逐渐降低; 短桩较长时, 复合地基的固结速率随短桩压缩模量的增加而

逐渐增大, 但增大或减小的幅度都很小, 总的来说, 短桩压缩模量的变化对多元不排水长短桩复合地基固结速率的影响很小。

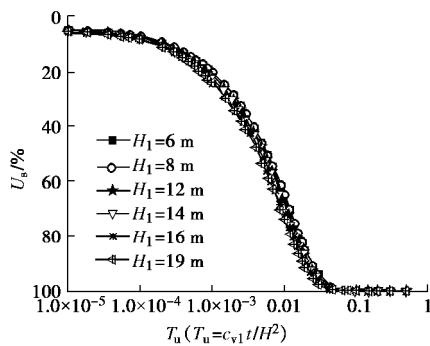


图 6 H_1 对复合地基固结速率的影响

Fig. 6 Influence of H_1 on consolidation rate

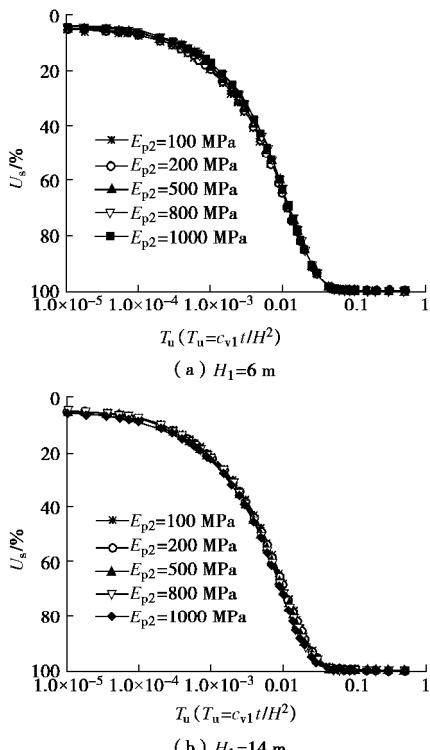


图 7 E_{p2} 对复合地基固结速率的影响

Fig. 7 Influence of E_{p2} on consolidation rate

图 8 给出短桩置换率 m_2 的变化对多元不排水长短桩复合地基固结速率的影响, 短桩长度 $H_1=14$ m。图 8 表明, 在固结初期, 复合地基的固结速率不随短桩置换率的增加而变化, 而在固结中、后期, 复合地基的固结速率随短桩置换率的增加而增大, 但增幅非常小, 据此可以认为, 短桩置换率的变化对多元不排水长短桩复合地基固结速率的影响很小。

(3) 地基土相对刚度的影响

考虑上、下加固区土的刚度不同。图 9 给出下、上加固区桩间土压缩模量比 E_{s2}/E_{s1} 对多元不排水长短

桩复合地基固结速率的影响, $E_{s1}=3$ MPa。从图 9 中可以发现, 多元不排水长短桩复合地基的固结速率随着下层土体压缩模量的增加而增大, 也就是说, 短桩桩端以下土的刚度越大, 复合地基的固结就越快。

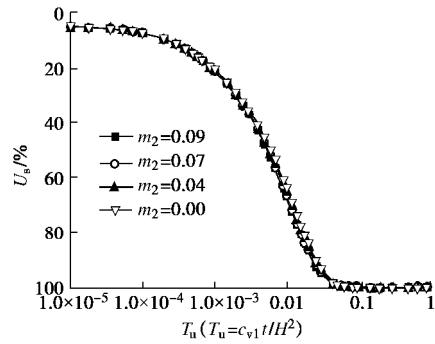


图 8 m_2 对复合地基固结速率的影响

Fig. 8 Influence of m_2 on consolidation rate

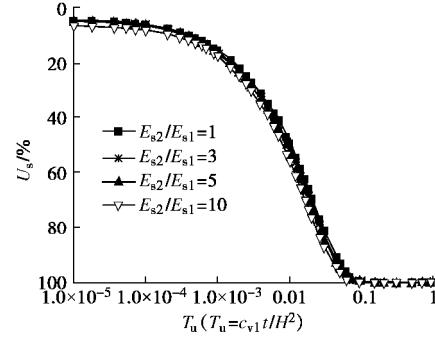


图 9 E_{s2}/E_{s1} 对复合地基固结速率的影响

Fig. 9 Influence of E_{s2}/E_{s1} on consolidation rate

6 结 论

本文建立了多元不排水长短桩复合地基固结解析解, 通过参数分析研究了这种新型复合地基的固结特性。主要结论如下:

(1) 本文固结解析解与刚性基础下多元不排水长短桩复合地基固结有限元解数值十分接近, 与柔性基础下复合地基有限元解数值也相当接近。

(2) 短桩置换率和刚度的变化对多元不排水长短桩复合地基固结速率的影响很小。复合地基固结速率随短桩长度的增加而增大, 但增幅不大。

(3) 多元不排水长短桩复合地基的固结速率受长桩置换率和刚度的影响较大。长桩置换率和压缩模量越大, 多元不排水长短桩复合地基固结越快。复合地基固结速率的增加率随长桩置换率和压缩模量的增加而逐渐减小。

(4) 多元不排水长短桩复合地基的固结速率与上、下加固区土体的相对刚度有关, 复合地基的固结速率随短桩以下土体压缩模量的增加而逐渐增大。

参考文献:

- [1] 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解[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. (in Chinese))
- [2] HAN J, YE S L. A theoretical solution for consolidation rates of stone column-reinforced foundations accounting for smear and well resistance effects[J]. International Journal of Geomechanics, 2002, **2**(2): 135 - 151.
- [3] 张玉国, 边亚东, 潘洪科, 等. 水平向渗透系数变化条件下散体料桩复合地基固结理论研究及分析[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. (in Chinese))
- [4] 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. (in Chinese))
- [5] WANG G C. Consolidation of soft clay foundations reinforced by stone columns under time-dependent loadings[J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 2009, **135**: 1922 - 1931.
- [6] LU M M, XIE K H, GUO B. Consolidation theory for a composite foundation considering radial and vertical flows within the column and the variation of soil permeability within the disturbed soil zone[J]. Canadian Geotechnical Journal, 2010, **47**: 207 - 217.
- [7] 赵明华, 刘敦平, 张 玲. 考虑桩体固结变形的散体材料复合地基固结解析计算[J]. 岩土力学, 2010, **31**(2): 483 - 488. (ZHAO Ming-hua, LIU Dun-ping, ZHANG Ling. Analytical solution for consolidation of composite ground with granular columns accounting for consolidation deformation of pile[J]. Rock and Soil Mechanics, 2010, **31**(2): 483 - 488. (in Chinese))
- [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. (in Chinese))
- [9] 卢萌盟, 谢康和, 李传勋, 等. 考虑桩土侧向变形的复合地基固结解[J]. 岩土工程学报, 2011, **33**(2): 181 - 187. (LU Meng-meng, XIE Kang-he, LI Chuan-xun, et al. Analytical solution for consolidation of composite ground considering lateral deformations of column and surrounding soil[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2011, **33**(2): 181 - 187. (in Chinese))
- [10] 张玉国, 孙 敏, 谢康和. 未打穿散体材料桩复合地基固结简化解研究[J]. 岩土力学, 2014, **35**(5): 1303 - 1310. (ZHANG Yu-guo, SUN Min, XIE Kang-he. Study of simplifying solution to consolidation of composite ground with partially penetrated granular columns[J]. Rock and Soil Mechanics, 2014, **35**(5): 1303 - 1310. (in Chinese))
- [11] 杨 涛, 李国维. 路堤荷载下不排水端承桩复合地基固结分析[J]. 岩土工程学报, 2007, **29**(12): 1831 - 1836. (YANG Tao, LI Guo-wei. Consolidation analysis of composite ground with undrained penetrating piles under embankment load[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2007, **29**(12): 1831 - 1836. (in Chinese))
- [12] 杨 涛, 石 磊, 李国维. 路堤分级填筑条件下不排水端承桩复合地基固结分析[J]. 公路交通科技, 2008, **25**(10): 31 - 35. (YANG Tao, SHI Lei, LI Guo-wei. Consolidation analysis of composite ground with undrained penetrating piles under stage embankment construction[J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2008, **25**(10): 31 - 35. (in Chinese))
- [13] MIAO L C, WANG X, KAVAZANJIAN J E. Consolidation of a double-layered compressible foundation partially penetrated by deep mixed columns[J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 2008, **134**(8): 1210 - 1214.
- [14] 卢萌盟, 谢康和, 周国庆, 等. 不排水桩复合地基固结解析解[J]. 岩土工程学报, 2011, **33**(4): 574 - 579. (LU Meng-meng, XIE Kang-he, ZHOU Guo-qing, et al. Analytical solution for consolidation of composite ground with impervious pile[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2011, **33**(4): 574 - 579. (in Chinese))
- [15] YANG T, YANG J Z, NI J. Analytical solution for the consolidation of a composite ground reinforced by partially penetrated impervious columns[J]. Computers and

- Geotechnics, 2014, **57**: 30 - 36.
- [16] 刘奋勇, 杨晓斌, 刘学. 混合桩型复合地基试验研究[J]. 岩土工程学报, 2003, **25**(1): 71 - 75. (LIU Fen-yong, YANG Xiao-bin, LIU Xue. Field test of a composite foundation including mixed pile[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2003, **25**(1): 71 - 75. (in Chinese))
- [17] 周德泉, 刘宏利, 张可能. 三元和四元复合地基工程特性的对比试验研究[J]. 建筑结构学报, 2004, **25**(5): 124 - 129. (ZHOU De-quan, LIU Hong-li, ZHANG Ke-neng. Experimental comparison study on behavior of three and four-element composite foundation[J]. Journal of Building Structures, 2004, **25**(5): 124 - 129. (in Chinese))
- [18] 崔 激, 闫澍旺, 周宏杰. 多桩型复合地基的载荷传递机理研究[J]. 岩土力学, 2005, **26**(2): 290 - 294. (CUI Wei, YAN Shu-wang, ZHOU Hong-jie. Load transfer behavior of multi-type-pile composite foundation[J]. Rock and Soil Mechanics, 2005, **26**(2): 290 - 294. (in Chinese))
- [19] 张先军, 赵世运. 哈大高速铁路新营口车站组合桩复合地基的应用研究[J]. 铁道工程学报, 2011(5): 34 - 39. (ZHANG Xian-jun, ZHAO Shi-yun. Research on application of composite foundation of composite pile for New Yingkou Station of Harbin-Dalian High-speed Railway[J]. Journal of Railway Engineering Society, 2011(5): 34 - 39. (in Chinese))
- [20] 沈宇鹏, 田亚护, 冯瑞玲. GC-CFG 组合桩复合地基处理高速铁路基底的应用研究[J]. 土木工程学报, 2013, **46**(2): 136 - 142. (SHEN Yu-peng, TIAN Ya-hu, FENG Rui-ling. Study on treatment of GC-CFG Composite piles to base of High-speed railway[J]. China Civil Engineering Journal, 2013, **46**(2): 136 - 142. (in Chinese))
- [21] 闫明礼, 王明山, 闫雪峰, 等. 多桩型复合地基设计计算方法探讨[J]. 岩土工程学报, 2003, **25**(3): 352 - 355. (YAN Ming-li, WANG Ming-shan, YAN Xue-feng, et al. Study on the calculation method of multi-type-pile composite foundation[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2003, **25**(3): 352 - 355. (in Chinese))
- [22] 郑俊杰, 高学伸, 王仙芝. 多元复合地基沉降计算方法探讨[J]. 华中科技大学学报(自然科学版), 2007, **35**(12): 87 - 90. (ZHENG Jun-jie, GAO Xue-shen, WANG Xian-zhi. Inquiring into the settlement calculation of multi-pile composite foundation[J]. Journal of Huazhong University of Science and Technology (Natural Science Edition), 2007, **35**(12): 87 - 90. (in Chinese))
- [23] 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 - 36. (XIE Kang-he. Theory of one-dimensional consolidation of double-layered ground and its applications[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 1994, **16**(5): 24 - 36. (in Chinese))
- [24] 赵树德. 土力学[M]. 北京: 高等教育出版社, 2001: 120 - 121. (ZHAO Shu-de. Soil mechanics[M]. Beijing: Higher Education Press, 2001: 120 - 121. (in Chinese))