

文章编号:1671-8879(2016)06-0032-07

# 不排水桩复合地基下卧层固结分析

杨 涛<sup>1</sup>, 杨 欢<sup>1</sup>, 李国维<sup>2</sup>

(1. 上海理工大学 环境与建筑学院, 上海 200093; 2. 河海大学 道路与铁道工程研究所, 江苏 南京 210098)

**摘 要:**对于深厚软土地基, 不排水桩常常未能打穿软土而形成悬浮桩复合地基。具有一定厚度下卧层的悬浮不排水桩复合地基, 其整体固结速率主要取决于下卧层土的固结速率, 目前尚未有较为简单的计算方法对下卧层土的固结速率进行估计。基于悬浮不排水桩复合地基平均超静孔隙水压力解答, 推导出复合地基下卧层固结度的解析解。利用该解析解进行参数分析, 研究了不排水桩的贯入比、置换率和桩土压缩模量比对复合地基下卧层固结速率的影响。研究表明: 对于水泥土桩等刚度较大的不排水桩复合地基, 其下卧层土的固结速率主要取决于桩的贯入比; 下卧层土的固结速率随不排水桩贯入比的增加而增大; 增加不排水桩的置换率, 下卧层土的固结速率略微增大。在把握下卧层固结特性的基础上, 将复合地基加固区视为下卧层的半透水边界, 基于半透水边界地基的一维固结理论, 提出不排水桩复合地基下卧层固结度分析的等效半透水边界法, 建立了考虑不排水桩贯入比和置换率影响的半透水边界厚度的计算公式。通过与解析解计算的下卧层固结速率的比较, 证明了下卧层固结度等效半透水边界法的正确性和有效性。

**关键词:**道路工程; 解析解; 固结; 下卧层; 不排水桩; 半透水边界

**中图分类号:**U416.1

**文献标志码:**A

## Consolidation analysis of underlying soil stratum in composite ground with floating impervious columns

YANG Tao<sup>1</sup>, YANG Huan<sup>1</sup>, LI Guo-wei<sup>2</sup>

(1. School of Environment and Architecture, University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai 200093, China; 2. Highway and Railway Engineering Institute, Hohai University, Nanjing 210098, Jiangsu, China)

**Abstract:** Impervious columns often penetrate partially into soft soil with a great thickness as floating columns. The overall average consolidation rate of a composite ground with floating impervious columns depends largely on that of the underlying untreated soil. So far, no simplified solution was available to estimate the consolidation rate of the underlying soil. Based on the analytical solutions to average excess pore water pressures within a composite ground with floating impervious columns, analytical solution to the average degree of consolidation of underlying soil was derived. Influences of the penetration ratio and replacement ratio of impervious columns and the constrained modulus ratio of columns to surrounding soil on consolidation rate of the underlying untreated soil were investigated using the proposed analytical solution for parameter analysis. The results show that for the composite ground with impervious

收稿日期: 2016-05-20

基金项目: 广东省交通运输厅科技计划项目(201102021); 上海理工大学国家级项目培育基金项目(16HJPY-MSO3)

作者简介: 杨 涛(1962-), 男, 江苏南京人, 教授, 工学博士, E-mail: shyangtao@163.com。

columns whose rigidity are larger than soil-cement material, the consolidation rate of the underlying soil depends mainly on the penetration ratio of the impervious columns. It increases with the increase of penetration ratio of impervious columns, and increases slightly with the increase of replacement ratio of the columns. Based on the consolidation behavior of the underlying soil, a new method for calculating average consolidation degree of the underlying soil, called as “equivalent impeded boundary method”, is proposed by use of the one-dimensional consolidation theory of natural ground with impeded drained boundary through regarding the reinforced zone in the composite ground as an impeded boundary of the underlying soil. The formula for calculating the thickness of impeded boundary is presented considering the effect of penetration ratio and area replacement ratio of the impervious columns. Correctness and calculation accuracy of the proposed method are verified through the comparison of consolidation degree of the underlying soil by the proposed method and the analytical solution. 6 figs, 25 refs.

**Key words:** road engineering; analytical solution; consolidation; underlying soil stratum; impervious column; impeded boundary

## 0 引言

复合地基中的竖向增强体有粘结材料桩和散体材料桩2种类型。碎石桩和砂桩等散体材料桩的渗透性远大于桩周土,荷载作用下它在桩周土中形成排水通道,故称为排水桩;水泥土桩、CFG桩和低标号混凝土桩等粘结材料桩的渗透性非常小,称为不排水桩。

复合地基固结理论是复合地基理论的重要组成部分。随着复合地基技术在国内外的广泛应用,越来越多的学者对复合地基的固结理论开展了研究。目前,排水桩复合地基固结理论取得了较为深入和系统的研究成果,建立的固结解析解能够考虑桩体的应力集中、涂抹和井阻效应、桩间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、附加应力沿地基线性变化、桩体变形、边界半透水以及未打穿软土等因素的影响<sup>[1-15]</sup>。较之散体材料桩复合地基,不排水桩复合地基的固结机理更为复杂。Yin等进行了水泥土桩单桩复合地基固结模型试验,发现水泥土桩复合地基的固结速率较之天然地基要大得多<sup>[16]</sup>;有些学者将不排水桩加速地基的固结机理归结为桩和桩间土组成的复合土体的复合固结系数远大于天然地基土;杨涛等推导出复合土体的固结方程,给出了分级加荷情况下端承不排水桩复合地基固结解析解<sup>[17-18]</sup>;缪林昌等将复合地基视为由加固区复合土和下卧层土组成的双层地基,基于双层天然地基一维固结理论建立了分级加荷条件下水泥土桩复合地基固结解析解<sup>[19]</sup>;实际上复合地基中的不排水桩并不会固结,卢萌盟等建立了考虑

荷载单级施加且桩间土水平向渗透系数变化的端承不排水桩复合地基固结解析解<sup>[20]</sup>;杨涛等建立了瞬时和单级加荷情况下悬浮不排水桩复合地基固结解析解<sup>[21-22]</sup>。

如果不排水桩未打穿软土层,则不排水桩复合地基由加固区和下卧层两部分组成。不排水桩的存在使得下卧层土的排水条件更差,因此,通常复合地基的固结速率主要取决于其下卧层土。已有的不排水桩复合地基固结度解析解仅适用于复合地基整体平均固结度的计算,无法分析下卧层的固结速率。目前,关于不排水桩复合地基下卧层固结问题的研究成果很少,华夏等提出将复合地基的加固区视为其下卧层的半透水边界的求解思路,本文称之为“半透水边界法”,但他们未能解决好半透水边界厚度计算这一核心问题<sup>[23]</sup>。为此,本文在分析不排水桩复合地基下卧层固结特性的基础上,提出半透水边界厚度的计算公式,从而建立了下卧层固结度半透水边界法计算模型。

## 1 固结模型与基本假定

### 1.1 固结模型

下页图1为悬浮不排水桩复合地基轴对称固结模型。 $r_e$ 为桩的影响半径, $H_1$ 、 $k_{v1}$ 、 $c_{v1}$ 、 $E_{s1}$ 和 $H_2$ 、 $k_{v2}$ 、 $c_{v2}$ 、 $E_{s2}$ 分别为复合地基加固区和下卧层土的厚度、竖向渗透系数、竖向固结系数和压缩模量, $H=H_1+H_2$ , $E_p$ 为桩体的压缩模量, $p$ 为作用在复合地基表面的荷载, $z$ 为深度。

### 1.2 计算假定

为建立悬浮不排水桩复合地基下卧层固结解析

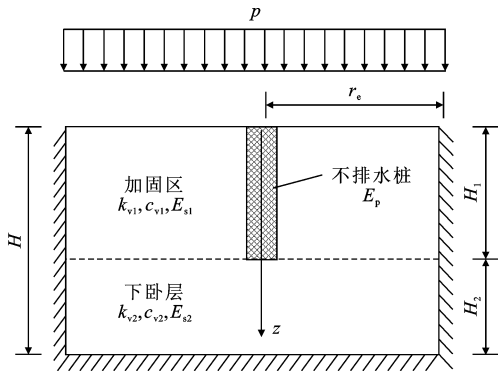


图1 不排水桩复合地基固结模型

Fig. 1 Consolidation model for composite ground with impervious columns

解,本文采用如下假定:

- (1) 桩为不排水桩;
- (2) 土体完全饱和,土中水渗流服从 Darcy 定律;
- (3) 在固结过程中,土的竖向渗透系数、固结系数和压缩模量均保持不变;
- (4) 桩周土只发生竖向渗流;
- (5) 荷载大面积作用,瞬时加载且在固结过程中保持不变。

## 2 复合地基下卧层固结特性

### 2.1 下卧层固结解析解

为简化列式,首先定义下面 4 个量纲一常数

$$a = \frac{k_{v2}}{k_{v1}}, b = \frac{mE_p + (1-m)E_{s1}}{(1-m)^2 E_{s2}}, c = \frac{H_2}{H_1}, \mu = \sqrt{\frac{b}{a}} \quad (1)$$

式中:  $m$  为复合地基置换率。

杨涛等给出单面排水 (PTIB) 情况下不排水桩复合地基下卧层土平均超静孔隙水压力  $\bar{u}_{s2}(z, t)$  为<sup>[21]</sup>

$$\bar{u}_{s2}(z, t) = p_s \sum_{n=1}^{\infty} \frac{C_n \sin(\lambda_n)}{\cos(\mu c \lambda_n)} \cos(\mu \lambda_n \frac{H_1 - z}{H_1}) e^{-\lambda_n^2 T_v} \quad (2)$$

$$C_n = \frac{2 \cos^2(\mu c \lambda_n)}{\lambda_n [\cos^2(\mu c \lambda_n) + b c \sin^2(\lambda_n)]} \quad (3)$$

$$T_v = c_{vle} t / H_1^2 \quad (4)$$

$$c_{vle} = \frac{mE_p + (1-m)E_{s1}}{(1-m)\gamma_w} R_{v1} \quad (5)$$

式中:  $\gamma_w$  为水的重度;  $p_s$  为桩间土表面承担的荷载,在等应变条件下可近似取  $p_s = p/(1-m)$ , 这种近似仅会高估固结初期的孔隙水压力值,并不会影响复合地基的固结速率<sup>[20]</sup>;  $c_{vle}$  为考虑不排水桩影响

时桩间土的等效固结系数;  $t$  为时间;  $\lambda_n$  为如下特征方程的根

$$\sqrt{ab} \tan(\lambda_n) \tan(\mu c \lambda_n) = 1 \quad (6)$$

由于不排水桩复合地基的置换率并不大,可将桩间土和下卧层土系统视为双层地基。则下卧层土的固结度  $U_2$  可按下式计算<sup>[24]</sup>

$$U_2 = 1 - \frac{1}{H_2} \int_{H_1}^H \frac{\bar{u}_{s2}(z, t)}{\bar{u}_{s2}(z, 0)} dz \quad (7)$$

将式(2)代入式(7),利用初始条件  $\bar{u}_{s2}(z, 0) = p_s$ , 即可得到悬浮不排水桩复合地基下卧层土固结度解析解

$$U_2 = 1 - \sum_{n=1}^{\infty} \frac{C_n \tan(\mu c \lambda_n) \sin(\lambda_n)}{\mu c \lambda_n} e^{-\lambda_n^2 T_v} \quad (8)$$

### 2.2 下卧层土固结特性

利用式(8)解析解进行参数分析,讨论悬浮不排水桩复合地基下卧层土体的固结特性。复合地基总厚度  $H=20$  m, 桩间和下卧层土的压缩模量  $E_{s1} = E_{s2} = 3$  MPa, 渗透系数为  $k_{v1} = k_{v2} = 10^{-6}$  cm/s。

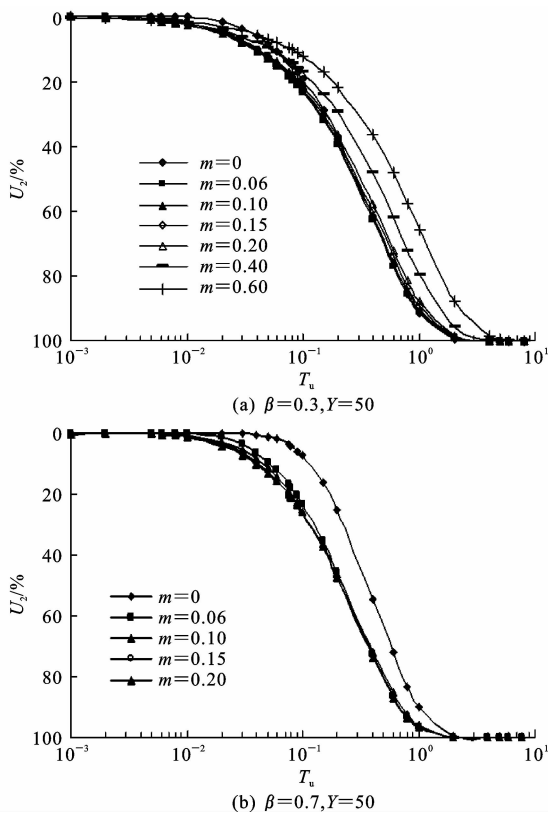
下页图 2 给出桩的贯入比  $\beta (\beta = H_1/H)$  分别取 0.3 和 0.7、桩土压缩模量比  $Y (Y = E_p/E_{s1})$  为 50 时,不同置换率下悬浮不排水桩复合地基下卧层土的固结度  $U_2$  随时间因素  $T_v (T_v = c_{v1} t/H^2)$  的变化曲线,  $m=0$  表示未加固的天然地基。图 2 清楚地表明,无论桩的贯入比取值多少,在工程上不排水桩复合地基置换率变化范围内 ( $0.05 \leq m \leq 0.2$ ), 下卧层土的固结速率随置换率的增加略有增大,但幅度非常小。从图 2(a) 中还可以发现,若置换率数值较高,超过了实际工程设计中不排水桩置换率的取值上限,则下卧层土的固结速率随置换率的增加大幅度减小,体现出不排水桩对下卧层土排水固结的阻碍作用。

下页图 3 给出置换率  $m=0.15$  时不同桩贯入比情况下桩土压缩模量比对复合地基下卧层固结速率的影响,图中  $Y=1$  表示天然地基。图 3 表明,下卧层土的固结速率随桩土压缩模量比的增加而增大,当桩土模量比超过 30 以后,下卧层固结速率随桩土模量比增加而增大的幅度很小。

下页图 4 给出桩的贯入比对复合地基下卧层固结速率的影响,此时,桩土压缩模量比和置换率分别为  $Y=50$  和  $m=0.15$ 。图 4 清楚地表明,不排水桩复合地基下卧层土的固结速率随桩贯入比的增加而增大,固结前期增幅较小,后期增幅较大。

## 3 下卧层固结等效半透水边界模型

为了能直接分析下卧层土的固结速率,必须考

图 2 置换率  $m$  对下卧层土固结速率的影响Fig. 2 Influence of  $m$  on consolidation rate of underlying soil

虑加固区对下卧层土固结的影响,它主要体现在 2 个方面:一是不排水桩对下卧层土向上排水的阻碍作用;二是不排水桩桩体应力集中效应导致下卧层土中附加应力分布发生变化。有限元分析表明,除了靠近桩端局部区域外,不排水桩复合地基下卧层附加应力分布曲线几乎与天然地基情况下的附加应力分布曲线平行,前者稍大于后者。基于此,可将加固区对下卧层土固结的影响用厚度为  $H_3$  的半透水边界来等效模拟,半透水边界土层的渗透系数等于桩间土渗透系数  $k_{v1}$ ,其上作用有复合地基桩端处平均附加应力集度  $q$ ,如下页图 5 所示。这样,就将不排水桩复合地基下卧层的固结分析问题转化为上部有厚度  $H_3$  半透水边界的厚度为  $H_2$  的天然地基受大面积均布荷载  $q$  的固结分析问题。

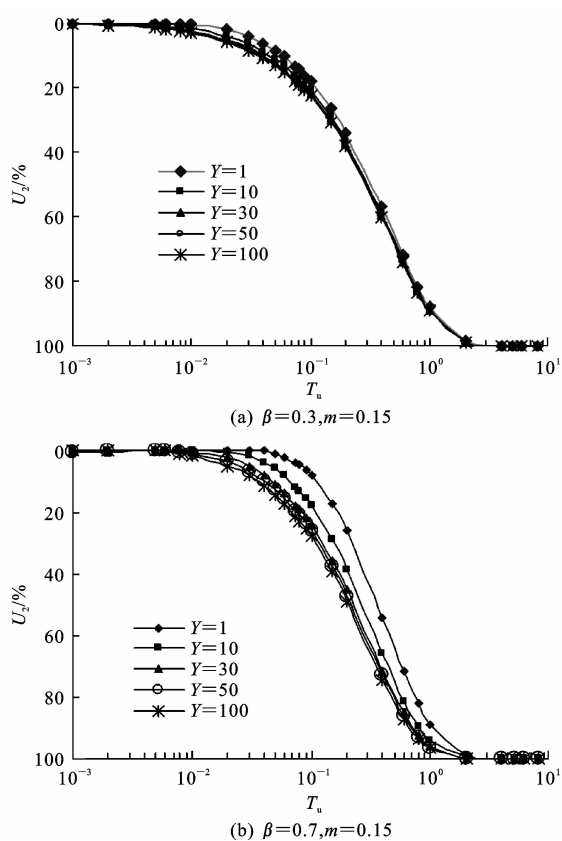
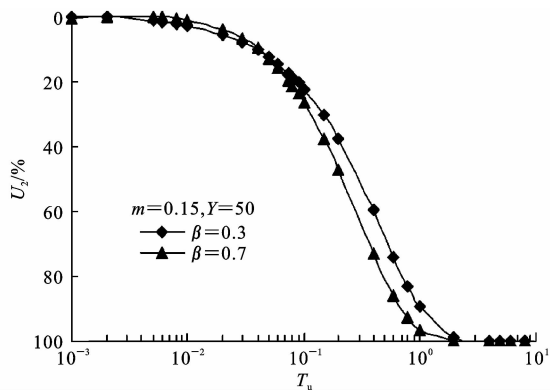
根据文献[25],瞬时加荷时下卧层土的固结方程可以写成如下形式

$$\frac{\partial u_2}{\partial t} = c_{v2} \frac{\partial^2 u_2}{\partial z^2} \quad (9)$$

式中:  $u_2$  为下卧层土中的平均孔隙水压力。

式(9)的定解条件为

$$z=0, \frac{\partial u_2}{\partial z} = \frac{R}{H_2} u_2 \quad (10)$$

图 3 桩土模量比  $Y$  对下卧层土固结速率的影响Fig. 3 Influence of  $Y$  on consolidation rate of underlying soil图 4 桩的贯入比  $\beta$  对下卧层土固结速率的影响Fig. 4 Influence of  $\beta$  on consolidation rate of underlying soil

$$z = H_2, \frac{\partial u_2}{\partial z} = 0 \quad (11)$$

$$t = 0, u_2(z, 0) = q \quad (12)$$

式中:  $R = \frac{k_{v1} H_2}{k_{v2} H_3}$ 。

如果  $H_3$  已知,则根据单层地基土半透水边界一维固结理论,可以得到下卧层土的固结度解析解<sup>[25]</sup>

$$U_2 = 1 - \sum_{m=1}^{\infty} \frac{2R^2}{\lambda_m^2 (\lambda_m^2 + R^2 + R)} e^{-\lambda_m^2 T_{v2}} \quad (13)$$

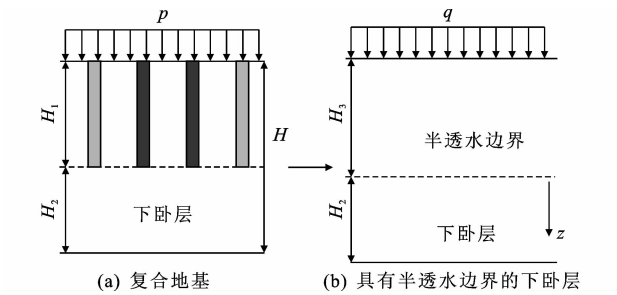


图 5 下卧层固结模型

Fig. 5 Consolidation model of underlying soil

式中： $T_{v2} = c_{v2}t/H_2^2$ ； $\lambda_m$  为式(14)特征方程的根

$$\lambda_m \tan(\lambda_m) - R = 0 \tag{14}$$

4 半透水边界厚度  $H_3$  的确定

式(13)表明,按等效半透水边界法计算悬浮不排水桩复合地基下卧层固结度的关键,在于确定半透水边界层的厚度  $H_3$ 。

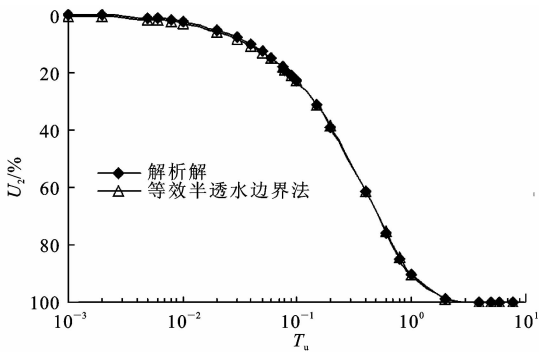
半透水边界层厚度  $H_3$  的计算公式要反映出下卧层土的固结特性。上述研究表明,悬浮不排水桩复合地基下卧层固结速率与桩的置换率、桩土模量比和桩的贯入比有关。当桩的置换率  $m \leq 0.2$  时,置换率的变化对下卧层固结速率的影响并不显著。桩土压缩模量比超过 30 以后其数值再继续增加,复合地基下卧层的固结速率变化较小。下卧层的固结速率随桩的贯入比的增加而增大。考虑到实际工程中水泥土桩加固软土地基时桩土模量比约为 30,CFG 桩和低标号混凝土桩等刚性桩的桩土模量比都超过了 30,因此在  $H_3$  的计算公式中可不考虑桩土模量比的影响,而仅考虑置换率和桩的贯入比的影响。通过大量不同影响因素下卧层土固结速率与解析解的计算比较,本文建议半透水边界厚度  $H_3$  的计算公式为

$$H_3 = H_1(1 + e^{-(4m+\beta)}) \tag{15}$$

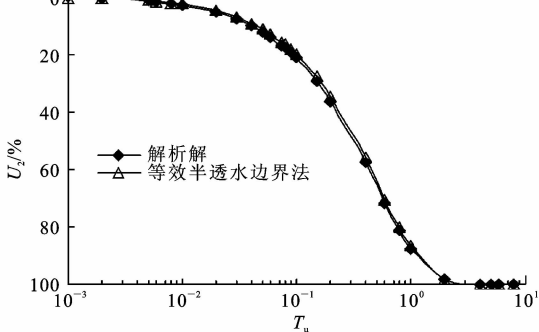
为验证下卧层固结分析的等效半透水边界法的计算精度,进行了如下算例分析。计算参数如下： $H=20\text{ m}$ ,  $k_{v1}=k_{v2}=10^{-6}\text{ cm/s}$ ,  $E_{s1}=E_{s2}=3\text{ MPa}$ ,  $E_p/E_{s1}=50$ 。

图 6 为桩的贯入比  $\beta$  分别为 0.3 和 0.7、置换率  $m$  分别为 0.1 和 0.2 这 4 种情况下,用等效半透水边界法和式(8)解析解计算获得的下卧层固结度曲线的比较,图中横坐标  $T_u = c_{v2}t/H^2$ 。

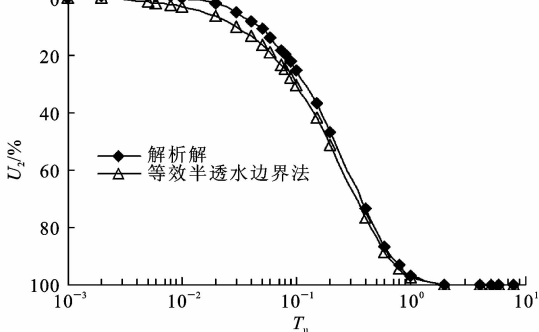
图 6 表明,由等效半透水边界法获得的下卧层固结度曲线与解析解十分接近,二者的绝对差值不超过 5%,说明等效半透水边界法具有足够的计算



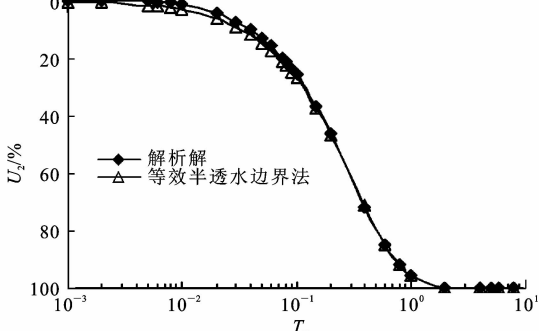
(a)  $\beta=0.3, m=0.1$



(b)  $\beta=0.3, m=0.2$



(c)  $\beta=0.7, m=0.1$



(d)  $\beta=0.7, m=0.2$

图 6 等效半透水边界法与解析解的比较

Fig. 6 Comparison of consolidation rates by present method and analytical solution

精度,可用于不排水桩复合地基下卧层固结度分析。

5 结 语

(1)对于具有一定厚度下卧层的不排水桩复合地基,其固结速率主要取决于下卧层土的固结速率。

(2)在工程设计采用的不排水桩置换率范围内( $m \leq 0.2$ ),不排水桩复合地基下卧层的固结速率随桩的贯入比、置换率和桩土模量比的增加而增大。置换率的影响较小,桩土模量比存在临界值。对于水泥土桩和刚性桩作为增强体的不排水桩复合地基,桩土模量比对下卧层固结速率的影响不大。

(3)建立了不排水桩复合地基下卧层固结的等效半透水边界法计算模型,给出了半透水边界厚度的计算公式。本文所建议的方法不需要加固区和下卧层的耦合固结分析,具有足够的计算精度,可在工程中采用。

(4)复合地基固结理论正处于快速发展之中,下一步应进行多元悬浮桩复合地基和组合桩复合地基整体平均固结度和相应下卧层平均固结度计算模型的研究。

## 参考文献:

## References:

- [1] 谢康和. 复合地基固结理论研究现状与发展[J]. 地基处理, 1993, 4(3): 1-14.  
XIE Kang-he. Present situation and development of consolidation theory of composite ground[J]. Ground Improvement, 1993, 4(3): 1-14. (in Chinese)
- [2] 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)
- [3] 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.
- [4] 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. (in Chinese)
- [5] 张玉国, 谢康和, 应宏伟, 等. 双面半透水边界的散体材料桩复合地基固结分析[J]. 岩土工程学报, 2005,

27(3): 304-307.

ZHANG Yu-guo, XIE Kang-he, YING Hong-wei, et al. Consolidation analysis of composite foundation of granular columns with impeded boundaries [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2005, 27(3): 304-307. (in Chinese)

- [6] 邢皓枫, 龚晓南, 杨晓军. 碎石桩复合地基固结简化分析[J]. 岩土工程学报, 2005, 27(5): 521-524.  
XING Hao-feng, GONG Xiao-nan, YANG Xiao-jun. Simplified analysis for consolidation of gravel-pile composite foundation[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2005, 27(5): 521-524. (in Chinese)
- [7] 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)
- [8] 邢皓枫, 叶观宝, 徐超, 等. 含下卧层复合地基固结的简化分析[J]. 同济大学学报: 自然科学版, 2008, 36(4): 472-476.  
XING Hao-feng, YE Guan-bao, XU Chao, et al. Simplified solution to composite foundation with substratum[J]. Journal of Tongji University: Natural Science, 2008, 36(4): 472-476. (in Chinese)
- [9] 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(12): 1922-1931.
- [10] CASTRO J, SAGASETA C. Consolidation around stone columns. influence of column deformation [J]. International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics, 2009, 33(7): 851-877.
- [11] XIE K H, LU M M, LIU G B. Equal strain consolidation for stone columns reinforced foundation [J]. International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics, 2009, 33(15): 1721-1735.
- [12] 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(2): 207-217.
- [13] 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)
- [14] LU M M, XIE K H, LI C X, et al. Consolidation solution for composite foundation considering a time-and depth-dependent stress increment along with three distribution patterns of soil permeability[J]. Journal of Zhejiang University—Science A: Applied Physics & Engineering, 2011, 12(4): 268-277.
- [15] 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)
- [16] YIN J H, FANG Z. Physical modeling of consolidation behavior of a composite foundation consisting of a cement-mixed soil column and untreated soft marine clay[J]. Geotechnique, 2006, 56(1): 63-68.
- [17] 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)
- [18] 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)
- [19] MIAO L C, WANG X H, KAVAZANJIAN 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.
- [20] 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)
- [21] 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(2): 30-36.
- [22] GONG X N, TIAN X J, HU W T. Simplified method for predicating consolidation settlement of soft ground improved by floating soil-cement column[J]. Journal of Central South University, 2015, 22(7): 2699-2706.
- [23] 华 夏, 王新辉, 徐俊军. 软土路基软弱下卧层的一维固结问题[J]. 交通标准化, 2006(5): 71-73.
- HUA Xia, WANG Xin-hui, XU Jun-jun. Solution for one dimensional consolidation of weak underlying substratum in soft clay ground[J]. Communications Standardization, 2006(5): 71-73. (in Chinese)
- [24] 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 of double-layer ground and its applications [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 1994, 16(5): 24-35. (in Chinese)
- [25] 谢康和. 层状土半透水边界一维固结分析[J]. 浙江大学学报: 自然科学版, 1996, 30(5): 567-575.
- XIE Kang-he. One dimensional consolidation analysis of layered soils with impeded boundaries[J]. Journal of Zhejiang University: Natural Science, 1996, 30(5): 567-575. (in Chinese)