

文章编号: 1000-7598 (2014) 05-1303-08

未打穿散体材料桩复合地基固结简化解研究

张玉国¹, 孙 敏¹, 谢康和²

(1. 中原工学院 建筑工程学院, 郑州 450007; 2. 浙江大学 岩土工程研究所, 杭州 310027)

摘 要: 利用平均固结度普遍解, 将未打穿散体材料桩复合地基转化为等效双层地基, 推导出未打穿散体材料桩复合地基固结简化解, 给出其平均固结度计算简化公式。根据简化解、现有解和有限单元法编制程序, 绘制考虑贯入比、桩体渗透系数、土体扰动区渗透系数和土体扰动区影响因子等因素对固结的影响曲线图, 分析了各因素对未打穿散体材料桩复合地基固结性状的影响, 并对 3 种计算方法所求出的平均固结度进行了比较研究, 进而探讨了简化解的适用性。研究表明, 无论是在单面排水还是在双面排水条件下, 简化解求出的平均固结度总体上是介于现有解和有限单元法二者之间, 尤其在固结过程的“中后期”(即固结度 $\geq 50\%$ 时)。从实用角度来看, 简化解的计算结果具有足够精度, 且简便、实用; 在各种影响因素中, 散体材料桩长度和桩体渗透系数对固结过程的影响最大。

关 键 词: 散体材料桩复合地基; 未打穿; 等效双层地基; 平均固结度; 解析解

中图分类号: TU 470

文献标识码: A

Study of simplifying solution to consolidation of composite ground with partially penetrated granular columns

ZHANG Yu-guo¹, SUN Min¹, XIE Kang-he²

(1. School of Civil Engineering and Architecture, Zhongyuan University of Technology, Zhengzhou 450007, China;

2. Institute of Geotechnical Engineering, Zhejiang University, Hangzhou 310027, China)

Abstract: A composite ground with partially penetrated granular columns is turned into a equivalent-double-layered ground on the basis of the general solution of the average degree of consolidation; and its simplifying analytical solution of 1D consolidation is worked out; furthermore, the simplifying formula of the average degree of consolidation is gained. Based on this solution, the present existing solutions and finite element method, these relevant programs are programmed. The consolidation process is investigated and the relevant results are prepared in graph forms which considering the influence of some factors including penetration ratio, permeability coefficient of a granular column, permeability coefficient of disturbed soil and impact factor of disturbed zone. The influence of various factors on the consolidation behavior of composite ground with partially penetrated granular columns is analyzed; and the comparative study of the average consolidation degrees by the three calculation methods is carried out; and then the applicability of the simplifying solution is discussed. The research results show that, the average consolidation degree of the simplifying solution under single-sided drainage or double-sided drainage conditions is between the ones of the existing solutions and the finite element method; and especially in the middle-latter of the consolidation process ($\geq 50\%$ degree of consolidation), the results of the simplifying solution meet the engineering precision requirements; and it is simple, and practical; and in the various influencing factors, both length and permeability coefficient of granular column have the most effects on the consolidation process.

Key words: composite ground with granular columns; partial penetration; equivalent-double-layered ground; average degree of consolidation; analytical solution

1 引 言

目前, 关于深厚软黏土层中未打穿砂井地基固结问题, 国内外学者已做了大量研究工作^[1-9]。虽

然散体材料桩比砂井更早应用于实际工程, 但对此类复合地基固结的研究比砂井地基迟得多。自 20 世纪 70 年代末以来, 有关散体材料桩复合地基方面的研究逐渐增多, 且在试验研究、数值分析和解析

收稿日期: 2013-01-28

基金项目: 国家自然科学基金项目 (No. U1204511); 河南省教育厅自然科学研究项目 (No. 2008A560016); 河南省基础与前沿技术研究 (No. 112300410286)。

第一作者简介: 张玉国, 男, 1973 年生, 博士, 副教授, 主要从事岩土工程和地下工程等方面的教学与研究工作。E-mail: zygumt@sina.com

解方面取得大量成果^[10-20]。然而,涉及到未打穿散体材料桩复合地基固结问题研究尚少,此方面的研究工作主要包括:王瑞春解析解、谢康和和徐洋有限元(FEM)法^[2, 13-14, 21-22]。在现有解中,需要注意的是:解析解的数学表达式过于复杂,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,对一般使用者来说,其单元划分的确定和参数录入等也是非常困难的。因此,有必要对未打穿散体材料桩复合地基平均固结度现有方法进行改进,寻找一种更为简便、实用的平均固结度计算方法。

首先,本文基于“双层地基法”^[23],将未打穿散体材料桩复合地基固结问题转化为等效双层地基固结问题,推导出其固结问题的简化解;其次,展开算例计算,分析未打穿散体材料桩复合地基固结规律;最后,将简化解、现有理论解和FEM法进行比较研究,明确未打穿散体材料桩复合地基固结简化解的适用性和合理性。

2 简化解研究

2.1 计算模型

图1为计算模型。图中 H 为软土层总厚度, h_1 为加固区土层的厚度(即散体材料桩的长度), h_2 为下卧层的厚度, k_{vn1} 、 k_{hn1} 和 k_{vs1} 、 k_{hs1} 分别为加固区土体未扰动区和扰动区的竖向、水平向渗透系数, E_{n1} 、 E_{s1} 分别为未扰动区和扰动区的压缩模量, k_w 、 E_w 分别为散体材料桩体的渗透系数和压缩模量, k_{v2} 、 E_{n2} 为下卧层土体的竖向渗透系数和压缩模量, r_w 为散体材料桩的半径, r_s 为扰动区的半径, r_e 为影响区的半径, d_w 为桩体直径($d_w = 2r_w$), q_0 为瞬时施加的均布荷载, r 、 z 为径向及竖向坐标, u_{n1} 、 u_{s1} 、 u_w 分别为加固区土体未扰动区、扰动区和桩体内任一点的孔压。

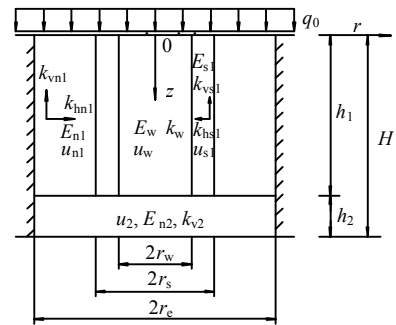
基于陈根媛^[22]针对未打穿砂井地基固结问题提出的双层地基法,本文首先把未打穿复合地基转化为未打穿砂井地基,再按双层地基法计算。在如图1(a)所示的未打穿散体材料桩复合地基中,桩和土共同承担荷载的作用,由于散体材料桩刚度较高,存在一定的应力集中,考虑到二者的变形协调,可以认为整个复合地基的竖向变形是均匀的,即符合Barron等应变条件。因此,为了简化计算,可先将该复合地基转化为固结等效的未打穿砂井地基,如图1(b)所示,其中有关参数如下:

$$E_{c1} = \frac{n^2 - s^2}{n^2} E_{n1} + \frac{s^2 - 1}{n^2} E_{s1} + \frac{1}{n^2} E_w \quad (1)$$

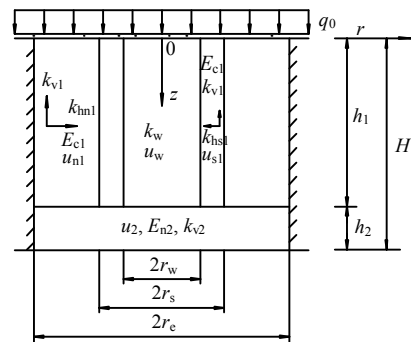
$$k_{v1} = \frac{n^2 - s^2}{n^2 - 1} k_{vn1} + \frac{s^2 - 1}{n^2 - 1} k_{vs1} \quad (2)$$

式中: E_{c1} 和 k_{v1} 分别为等效的未打穿砂井地基中砂井长度范围内土体的压缩模量和竖向渗透系数;桩径比 $n = r_e / r_w$;土体扰动区影响因子 $s = r_s / r_w$ 。

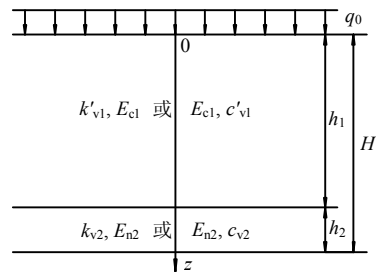
根据平均固结度等效原则将等效的未打穿砂井地基转化为如图1(c)所示的等效的双层地基。等效双层地基第1层的竖向固结系数 c'_{v1} 或渗透系数 k'_{v1} 的确定的具体方法如下:



(a) 未打穿散体材料桩复合地基



(b) 未打穿等效砂井地基



(c) 等效双层地基

图1 计算模型

Fig.1 Calculating models

等效的未打穿砂井地基中砂井长度范围内土层的平均固结度按文献[2]计算,即

$$U_{tz} = 1 - \alpha e^{-\beta_{tz} t} \quad (3)$$

其中:

$$\left. \begin{aligned} \alpha &= 8/\pi^2 \\ \beta_{tz} &= \frac{\pi^2 c_{v1}}{4h_1^2} + \frac{8c_{h1}}{d_e^2(F + \pi G)} \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

等效的双层地基第1层的平均固结度按太沙基固结理论简化式计算, 即

$$U_z = 1 - \alpha e^{-\beta_z' t} \quad (5)$$

$$\text{式中: } \beta_z' = \frac{\pi^2 c_{v1}'}{4h_1^2}.$$

按平均固结度等效原则, 即在任一时刻 t , 式(3)与式(5)必须相等, 故有 $\beta_{tz} = \beta_z'$, 由此可得

$$c_{v1}' = c_{v1} + \frac{32c_{h1}}{\pi^2(F + \pi G)} \frac{h_1^2}{d_e^2} \quad (6)$$

其中:

$$c_{v1} = \frac{k_{v1} E_{c1}}{\gamma_w} \quad (7)$$

$$c_{h1} = \frac{k_{h1} E_{c1}}{\gamma_w} \quad (8)$$

$$F = \ln \frac{n}{s} + \frac{k_{h1}}{k_{hs1}} \ln s - \frac{3}{4} \quad (9)$$

$$G = \frac{k_{h1}}{k_w} \frac{h_1^2}{d_w^2} \quad (10)$$

等效双层地基第1层土的竖向渗透系数 k_{v1}' 可通过 c_{v1}' 求得, 即

$$k_{v1}' = \frac{\gamma_w c_{v1}'}{E_{c1}} \quad (11)$$

至此, 已将未打穿散体材料桩复合地基转化为等效的双层地基。

对图1(c)所示双层地基, 其一维固结方程^[23]为

$$\frac{\partial u_i}{\partial t} = c_{vi} \frac{\partial^2 u_i}{\partial z^2}, \quad (z_{i-1} \leq z \leq z_i, \quad i=1, 2) \quad (12)$$

求解条件为

$$z=0, \quad u_1=0 \quad (13)$$

$$z=h_1, \quad u_1=u_2 \quad (14)$$

$$z=h_1, \quad k_{v1}' \frac{\partial u_1}{\partial z} = k_{v2} \frac{\partial u_2}{\partial z} \quad (15)$$

$$z=H, \quad \frac{\partial u_2}{\partial z} = 0 \quad (\text{PTIB}) \quad (16)$$

$$z=H, \quad u_2=0 \quad (\text{PTPB}) \quad (17)$$

$$t=0, \quad u_1=u_2=u_0=q_0 \quad (18)$$

式中: u_1 、 u_2 分别为等效双层地基中土层1、土层2中任一深度处、任一时刻的超静孔压; $c_{v1} = c_{v1}'$, $c_{v2} = k_{v2} E_{n2} / \gamma_w$; $z_0 = 0$, $z_1 = h_1$, $z_2 = H$; PTIB为单面排水, 即地基顶部透水, 底部不透水; PTPB为双面排水。

2.2 未打穿散体材料桩复合地基超静孔压

为了方便计算分析, 现定义无量纲参数如下:

$$a_1 = \frac{k_{vn1}}{k_{v2}}, \quad a_2 = \frac{k_{vs1}}{k_{v2}}, \quad b = \frac{E_{s1}}{E_{s2}}, \quad c = \frac{h_2}{h_1} \quad (19)$$

$$\alpha_e = \frac{n^2 - s^2}{n^2} + \frac{s^2 - 1}{n^2} \frac{E_{s1}}{E_{n1}} + \frac{1}{n^2} \frac{E_w}{E_{n1}} \quad (20)$$

将式(20)代入式(1), 则有

$$E_{c1} = \alpha_e E_{n1} \quad (21)$$

参照天然双层地基固结解法^[24], 确定等效双层地基在不同排水条件下的固结解。

(1) 单面排水(PTIB)条件下的一般解

由固结方程式(12)和求解条件(13)~(16), 求得等效双层地基一维固结一般解为

$$u_1 = \sum_{m=1}^{\infty} A_m \sin\left(\lambda_m \frac{z}{h_1}\right) e^{-\beta_m t} \quad (22)$$

$$u_2 = \sum_{m=1}^{\infty} A_m \frac{\sin(\lambda_m)}{\cos(\mu \lambda_m c)} \cos\left[\mu \lambda_m \left(\frac{H-z}{h_1}\right)\right] e^{-\beta_m t} \quad (23)$$

其中:

$$\beta_m = c_{v1}' \lambda_m^2 / h_1^2 \quad (24)$$

$$\mu = \sqrt{c_{v1}' / c_{v2}} \quad (25)$$

λ_m 由下列特征方程确定:

$$\tan(\lambda_m) = \frac{k_{v1}'}{k_{v2} \mu} \cot(\mu \lambda_m c) \quad (26)$$

利用三角函数正交性和初始条件式(18), 可以确定系数 A_m , 即

$$A_m = u_0 \frac{\int_0^{h_1} g_{m1}(z) dz + b \int_{h_1}^H g_{m2}(z) dz}{\int_0^{h_1} g_{m1}^2(z) dz + b \int_{h_1}^H g_{m2}^2(z) dz} \quad (27)$$

其中:

$$g_{m1}(z) = \sin\left(\lambda_m \frac{z}{h_1}\right) \quad (28)$$

$$g_{m2}(z) = \frac{\sin(\lambda_m)}{\cos(\mu\lambda_m c)} \cos\left[\mu\lambda_m \left(\frac{H-z}{h_1}\right)\right] \quad (29)$$

根据式 (27), 可求得

$$A_m = u_0 \frac{4(1 - \cos \lambda_m + A_{m1})}{2\lambda_m - \sin(2\lambda_m) + A_{m2} + A_{m3}} \quad (30)$$

$$A_{m1} = \frac{b\alpha_e}{\mu} \sin \lambda_m \tan(\mu\lambda_m c) \quad (31)$$

$$A_{m2} = 2bc\alpha_e \lambda_m \frac{\sin^2(\lambda_m)}{\cos^2(\mu\lambda_m c)} \quad (32)$$

$$A_{m3} = \frac{2b\alpha_e}{\mu} \sin^2(\lambda_m) \tan(\mu\lambda_m c) \quad (33)$$

(2) 双面排水 (PTPB) 条件下的一般解

用类似于单面排水情况下的求解方法, 可求得双面排水条件下等效双层地基一维固结一般解为

$$u_1 = \sum_{m=1}^{\infty} A_m \sin\left(\lambda_m \frac{z}{h_1}\right) e^{-\beta_m t} \quad (34)$$

$$u_2 = \sum_{m=1}^{\infty} A_m \frac{\sin \lambda_m}{\sin(\mu\lambda_m c)} \sin\left[\mu\lambda_m \left(\frac{H-z}{h_1}\right)\right] e^{-\beta_m t} \quad (35)$$

$$A_m = u_0 \frac{4(1 - \cos \lambda_m + A_{m1} - A_{m2})}{2\lambda_m - \sin(2\lambda_m) + A_{m3} - A_{m4}} \quad (36)$$

其中:

$$A_{m1} = \frac{b\alpha_e}{\mu} \sin(\lambda_m) \frac{1}{\sin(\mu\lambda_m c)} \quad (37)$$

$$A_{m2} = \frac{b\alpha_e}{\mu} \sin(\lambda_m) \cot(\mu\lambda_m c) \quad (38)$$

$$A_{m3} = 2bc\alpha_e \lambda_m \frac{\sin^2 \lambda_m}{\sin^2(\mu\lambda_m c)} \quad (39)$$

$$A_{m4} = \frac{2b\alpha_e}{\mu} \sin^2(\lambda_m) \cot(\mu\lambda_m c) \quad (40)$$

λ_m 则由以下特征方程确定, 即

$$\tan(\lambda_m) = -\frac{\mu}{b\alpha_e} \tan(\mu\lambda_m c) \quad (41)$$

2.3 未打穿散体材料桩复合地基固结度解

(1) 按孔压定义的固结度

任一深度处的固结度 (PTIB 或 PTPB) 为

$$\bar{U}_1(z, t) = 1 - \frac{u_1}{u_0}, \quad 0 \leq z \leq h_1 \quad (42)$$

$$\bar{U}_2(z, t) = 1 - \frac{u_2}{u_0}, \quad h_1 \leq z \leq H \quad (43)$$

第 1 层 (加固区) 的平均固结度为 (PTIB 或 PTPB):

$$U_1 = 1 - \frac{1}{h_1} \int_0^{h_1} \frac{u_1}{u_0} dz = 1 - \sum_{m=1}^{\infty} \frac{A_m}{u_0} \frac{1}{\lambda_m} (1 - \cos \lambda_m) e^{-\beta_m t} \quad (44)$$

第 2 层 (下卧层) 的平均固结度为

对于 PTIB, 有

$$U_2 = 1 - \frac{1}{h_2} \int_{h_1}^H \frac{u_2}{u_0} dz = 1 - \sum_{m=1}^{\infty} \frac{A_m}{u_0} \frac{1}{\mu\lambda_m c} \sin(\lambda_m) \tan(\mu\lambda_m c) e^{-\beta_m t} \quad (45)$$

对于 PTPB, 有

$$U_2 = 1 - \frac{1}{h_2} \int_{h_1}^H \frac{u_2}{u_0} dz = 1 - \sum_{m=1}^{\infty} \frac{A_m}{u_0} \frac{1}{\mu\lambda_m c} \frac{\sin(\lambda_m)}{\sin(\mu\lambda_m c)} [1 - \cos(\mu\lambda_m c)] e^{-\beta_m t} \quad (46)$$

整个未打穿散体材料桩复合地基的平均固结度为

$$U_p = \frac{1}{H} (h_1 U_1 + h_2 U_2) = \rho_w U_1 + (1 - \rho_w) U_2 \quad (47)$$

(2) 按沉降定义的固结度

未打穿散体材料桩复合地基平均固结度为

$$U_s = \frac{\frac{1}{E_{c1}} \int_0^{h_1} (u_0 - u_1) dz + \frac{1}{E_{n2}} \int_{h_1}^H (u_0 - u_2) dz}{\left(\frac{1}{E_{c1}} h_1 + \frac{1}{E_{n2}} h_2\right) u_0} = \frac{\rho_w U_1 + (1 - \rho_w) b\alpha_e U_2}{\rho_w + (1 - \rho_w) b\alpha_e} \quad (48)$$

比较式 (47) 和式 (48) 可知, $U_p \neq U_s$, 仅当 $E_{c1} = E_{n2}$ 或即 $b\alpha_e = 1$ 时, 有 $U_p = U_s$ 。

为了方便计算分析和绘图, 令上面各式中 $\beta_m t =$

$\Gamma_m T_h$, $T_h = \frac{c_{h1} t}{d_e^2}$, 则利用式 (6) ~ (11)、(19)、

(20)、(24)、(25)，可得

$$\Gamma_m = \left[\frac{k_{v1}}{k_{hn1}} + \frac{32}{\pi^2 (F + \pi G)} \frac{h_1^2}{d_e^2} \right] \lambda_m^2 \frac{d_e^2}{h_1^2} \quad (49)$$

$$\frac{k_{v1}}{k_{hn1}} = \frac{n^2 - s^2}{n^2 - 1} \frac{k_{vn1}}{k_{hn1}} + \frac{s^2 - 1}{n^2 - 1} \frac{k_{vs1}}{k_{hn1}} \quad (50)$$

$$\mu = \sqrt{\frac{c_{v1}}{c_{v2}} + \frac{32}{\pi^2 (F + \pi G)} \frac{k_{hn1}}{k_{vs1}} \frac{E_{c1}}{E_{n2}} \frac{h_1^2}{d_e^2}} = \sqrt{\frac{c_{v1}}{c_{v2}} + \frac{32b\alpha_e}{\pi^2 (F + \pi G)} \frac{k_{hn1}}{k_{vs1}} \frac{h_1^2}{d_e^2}} \quad (51)$$

$$\frac{c_{v1}}{c_{v2}} = \frac{E_{c1}}{E_{n2}} \frac{k_{v1}}{k_{v2}} = \frac{b\alpha_e \left[a_1 (n^2 - s^2) + a_2 (s^2 - 1) \right]}{n^2 - 1} \quad (52)$$

至此，按双层地基法计算未打穿复合地基固结简化解和固结度计算公式已全部得到。

比较简化解和现有理论解^[13]易知，简化解在形

式上更简单，因此，在应用上也将更方便。

3 算例分析

未打穿散体材料桩复合地基（在打设散体材料桩之前，软黏土地基被认为是均质的，即 $a_1=1$ 和 $b=1$ ）固结速率的快慢取决于排水条件和以下主要无量纲化参数： a_1 、 a_2 、 b 、 h_2/h_1 、 n 、 s 、 H/d_w 、 h_1/H 、 k_{vn1}/k_{hn1} 、 k_{hn1}/k_{hs1} 、 k_{vs1}/k_{vn1} 、 k_{vn1}/k_w 、 E_{s1}/E_{n1} 和 E_{n1}/E_w 。首先，利用简化解对散体材料桩复合地基固结性状进行研究；然后，对采用等效双层地基法得到的未打穿散体材料桩复合地基固结简化解进行适用性（或者是可行性）研究。为此，通过算例，将本文解与现有解和有限元法进行比较分析。在计算中所采用的程序为：基于简化解和王瑞春解^[13]所编制的计算程序以及SDSS4.2软件^[14, 24]。计算结果如图2~6所示，表1列出了与各图相应的无量纲化参数取值。在各图表中，贯入比 $\rho_w = h_1/H$ ，径向固结时间因子 $T_h = c_{h1}t/d_e^2$ 。

表1 计算参数取值一览表

Table 1 The values of calculated parameters

图序	a_2	n	s	ρ	H/d_w	k_{vn1}/k_{hn1}	k_{hn1}/k_{hs1}	k_{vs1}/k_{vn1}	E_{s1}/E_{n1}	E_w/E_{n1}	k_{vn1}/k_w
2	0.8	6	1.5	变值	50	1	1.5	0.8	0.5	5	0.000 1
3	0.8	6	1.5	0.7	50	1	1.5	0.8	0.5	5	变值
4	0.8	6	1.5	0.7	50	1	变值	变值	0.5	5	0.000 1
5	0.8	6	变值	0.7	50	1	1.5	0.8	0.5	5	0.000 1
6(a)	0.8	6	1.5	0.4	50	1	1.5	0.8	0.5	5	0.000 1
6(b)	0.8	6	1.5	0.6	50	1	1.5	0.8	0.5	5	0.000 1
6(c)	0.8	6	1.5	0.8	50	1	1.5	0.8	0.5	5	0.000 1
6(d)	0.8	6	1.5	0.4	50	1	1.5	0.8	0.5	5	0.000 1
6(e)	0.8	6	1.5	0.6	50	1	1.5	0.8	0.5	5	0.000 1
6(f)	0.8	6	1.5	0.8	50	1	1.5	0.8	0.5	5	0.000 1

(1) 基于简化解的未打穿散体材料桩复合地基固结性状分析

在图2~5中，分别绘制了 ρ_w 、 k_w 、扰动区土体渗透系数（包括 k_{hs1} 和 k_{vs1} ）以及扰动区影响因子 s 等因素对固结过程的影响曲线。

通过对这些图中固结曲线的对比分析可知， ρ_w 、 k_w 、 k_{hs1} 和 k_{vs1} 越大，固结越快；但 s 值越大，固结越慢。在这些影响因素中，散体材料桩桩长 h_1 和桩体渗透系数 k_w 对固结的影响最大。

(2) 未打穿散体材料桩复合地基固结简化解的适用性研究

图6为简化解、现有理论解^[13]和有限元解的固结曲线对比图。其中 ρ_w 取值范围在0.4~0.8之间， $E_{n1}=3\text{ MPa}$ ， $k_{vn1}=1.0\times 10^{-6}\text{ cm/s}$ ， $\gamma_w=9.8\text{ kN/m}^3$ ， $q_0=100\text{ kPa}$ ，其他无量纲化参数见表1。

比较分析图6后可知，无论是单面还是在双面排水条件下，现有解（王瑞春解析解）^[13]所求出的平均固结度一般均大于有限元计算结果，简化解求出的平均固结度则总体上介于现有解^[13]和有限元法（FEM）^[14, 22]之间，尤其在固结的中后期（即固结度 $\geq 50\%$ 时）。因此，从实用角度看，与现有解和有限元法相比，简化解具有足够精度，且简便实用。

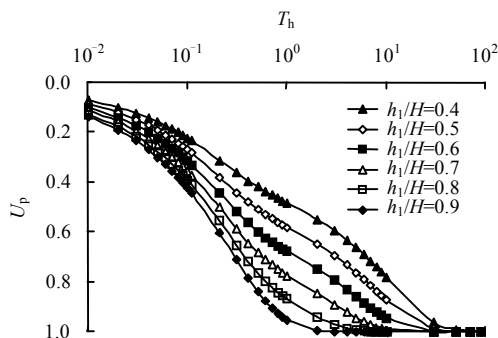
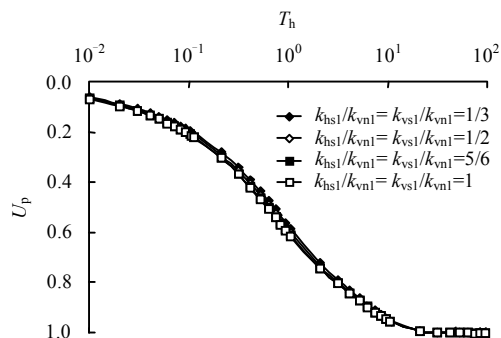
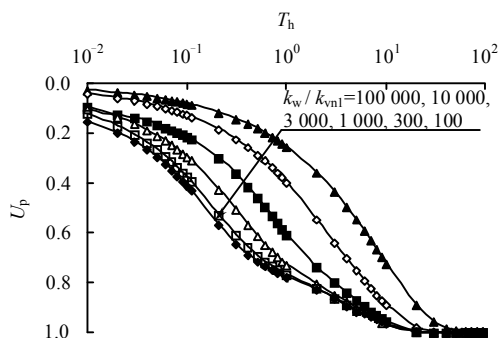
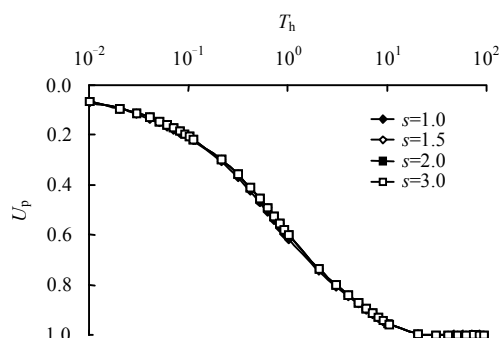
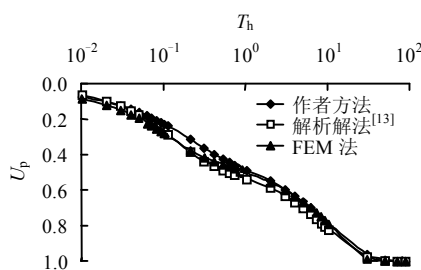
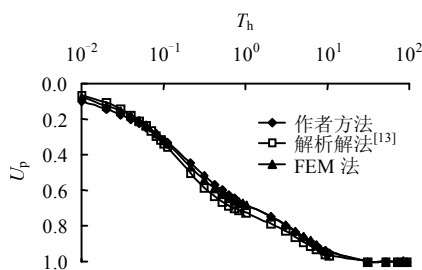
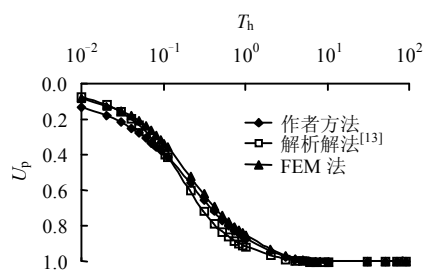
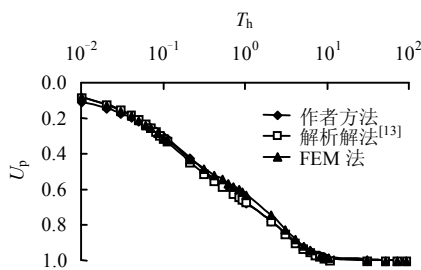
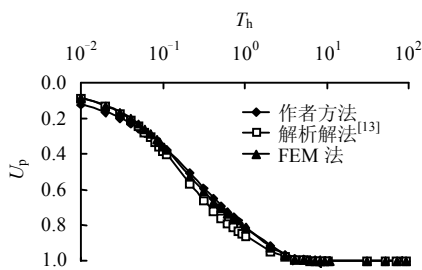
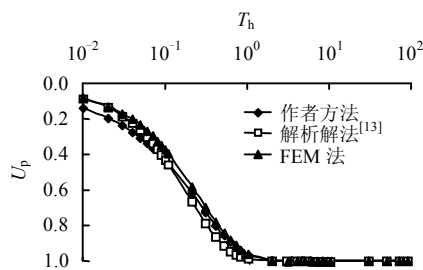
图2 ρ_w 对固结过程的影响曲线 (PTIB)Fig.2 Influence of ρ_w on consolidation process (PTIB)图4 k_{hs1} 和 k_{vs1} 对固结过程的影响曲线 ($\rho_w = 0.7$, PTIB)Fig.4 Influence of k_{hs1} and k_{vs1} on consolidation process ($\rho_w = 0.7$, PTIB)图3 k_w 对固结过程的影响曲线 ($\rho_w = 0.7$, PTIB)Fig.3 Influence of k_w on consolidation process ($\rho_w = 0.7$, PTIB)图5 s 对固结过程的影响曲线 ($\rho_w = 0.7$, PTIB)Fig.5 Influence of s on consolidation process ($\rho_w = 0.7$, PTIB)(a) $\rho_w = 0.4$, PTIB(b) $\rho_w = 0.6$, PTIB(c) $\rho_w = 0.8$, PTIB(d) $\rho_w = 0.4$, PTPB(e) $\rho_w = 0.6$, PTPB(f) $\rho_w = 0.8$, PTPB

图6 简化解与现有解析解和有限元的平均固结度曲线比较

Fig.6 Comparison of the average consolidation degree curves by simplifying solution, existing solution and FEM

4 结 论

(1) 基于“双层地基法”，推导出未打穿散体材料桩复合地基固结问题的简化解，分别给出加固区

和下卧层的平均固结度计算式，进而给出整个地基的平均固结度计算式。

(2) 在单面或双面排水条件下，现有解所求固结度一般均大于FEM计算结果，简化解总体上介于

二者之间, 尤其在固结的中后期(即固结度 $\geq 50\%$ 时), 从实用角度来看, 简化解具有足够精度。

(3) 在未打穿散体材料桩复合地基的固结过程中, ρ_w 、 k_w 、 k_{hs1} 和 k_{vs1} 越大, 固结越快; 但 s 值越大, 固结越慢; 在各种影响因素中, 散体材料桩长度和桩体渗透系数对固结的影响最大。

参 考 文 献

- [1] HART E G, KONDNER R L, BOYER W C. Analysis for partially penetrating sand drains[J]. **Journal of Soil Mechanics and Foundation Division, ASCE**, 1958, 84(SM4): 1—15.
- [2] 谢康和. 砂井地基固结理论、数值分析与优化设计[博士学位论文 D]. 杭州: 浙江大学, 1987.
- [3] TANG X W, ONITSUKA K. Consolidation of ground with partially penetrated vertical drains[J]. **Geotechnical Engineer Journal**, 1998, 29(2): 209—231.
- [4] 张玉国, 谢康和, 庄迎春, 等. 未打穿砂井地基固结理论计算分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2005, 24(11): 4164—4171.
ZHANG Yu-guo, XIE Kang-he, ZHUANG Ying-chun, et al. Calculation and analysis of consolidation theory of ground by partially penetrated sand drain[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2005, 24(11): 4164—4171.
- [5] 张玉国, 谢康和, 王哲, 等. 未打穿砂井地基下卧层固结研究分析[J]. 岩土力学, 2005, 26(11): 1737—1742.
ZHANG Yu-guo, XIE Kang-he, WANG Zhe, et al. Analysis of consolidation of underlying soft layer of ground by partially penetrated sand drain[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2005, 26(11): 1737—1742.
- [6] 郭彪, 龚晓南, 卢萌盟, 等. 考虑涂抹作用的未打穿砂井地基固结理论分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2009, 28(12): 2561—2568.
GUO Biao, GONG Xiao-nan, LU Meng-meng, et al. Theoretical analysis of partially penetrated sand drains foundation in consideration of smear effect[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2009, 28(12): 2561—2568.
- [7] 邹新军, 杨眉, 赵明华. 未打穿砂井复合地基承载机理模型试验研究[J]. 岩土工程学报, 2010, 32(增刊 2): 1—4.
ZOU Xin-jun, YANG Mei, ZHAO Ming-hua. Bearing behavior of ground with partially penetrated sand wells by model testing[J]. **Chinese Journal of Geotechnical Engineering**, 2010, 32(Supp.2): 1—4.
- [8] 耿雪玉, 吕顺, 于洁. 基于真空-堆载联合预压法的未打穿竖井地基固结分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2011, 30(10): 2151—2155.
GENG Xue-yu, LÜ Shun, YU Jie. Consolidation of partially penetrated vertical drain with vacuum-surge preloading[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2011, 30(10): 2151—2155.
- [9] 邹新军, 杨眉, 赵明华. 变荷载下考虑三维渗流的未打穿砂井地基固结分析[J]. 岩土力学, 2011, 32(增刊 2): 127—131.
ZOU Xin-jun, YANG Mei, ZHAO Ming-hua. Consolidation of ground with partially penetrated sand wells considering three-dimensional seepage under time-dependent loading[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2011, 32(Supp.2): 127—131.
- [10] YOSHIKUNI H. Design and control of construction in the vertical drain method[M]. Tokyo: [s. n.], 1979.
- [11] TANG X W. A study for consolidation of ground with vertical drain system[D]. Saga: Saga University, 1998.
- [12] XIE K H, GAO P, XIE X Y. Consolidation theory for soft clays reinforced by cement of granular column[C]// Proceedings of 10th International Conference of the Association for Computer Methods and Advances in Geomechanics. Tucson: [s. n.], 2001: 1263—1268.
- [13] 王瑞春. 竖井地基和散体材料桩复合地基固结解析研究[博士学位论文 D]. 杭州: 浙江大学, 2001.
- [14] 徐洋. 复合地基固结与变形的计算理论及数值分析[博士学位论文 D]. 杭州: 浙江大学, 2004.
- [15] SANG JAE HAN, SOO SAM KIM, HAN KYU RYU. Behavior of composite ground reinforced by sand compaction piles[J]. **International Journal of Offshore and Polar Engineering**, 2007, 17(3): 233—239.
- [16] XIE KANG-HE, LU MENG-MENG, HU AN-FENG, et al. A general theoretical solution for the consolidation of a composite foundation[J]. **Computers and Geotechnics**, 2009, 36(1—2): 24—30.
- [17] HUANG JIE, HAN JIE. 3D coupled mechanical and hydraulic modeling of a geosynthetics-reinforced deep mixed column-supported embankment[J]. **Geotextiles and Geomembranes**, 2009, 27(4): 272—280.
- [18] 尚新生, 林银飞, 王明程, 等. 散体-柔性桩组合和散体-刚性桩组合复合地基的固结解[J]. 岩石力学与工程学报, 2009, 28(增刊 2): 3733—3738.
SHANG Xin-sheng, LIN Yin-fei, WANG Ming-cheng, et al.

- Analytical result of consolidation of loose-flexible pile and loose-rigidity pile composite foundation[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2009, 28(Supp.2): 3733—3738.
- [19] 赵明华, 刘敦平, 张玲. 考虑桩体固结变形的散体材料桩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.
- [20] 温世清, 刘汉龙, 闫春雷, 等. 浆固碎石桩复合地基沉降分析[J]. **解放军理工大学学报(自然科学版)**, 2012, 13(1): 92—96.
- WEN Shi-qing, LIU Han-long, YAN Chun-lei, et al. Settlement analysis of composite foundation reinforced by grouted gavel pile[J]. **Journal of PLA University of Science and Technology(Natural Science Edition)**, 2012, 13(1): 92—96.
- [21] 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.
- [22] XIE K H, XU Y, HU A F. Study on consolidation of composite foundation under highway[C]//Proceedings of 12th Asian Regional Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering. Singapore: World Scientific, 2003.
- [23] 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. Improvement recommendations of one-dimensional calculation method consolidation of layered soils and the calculation of sand drain foundation[J]. **Journal of Nanjing Hydraulic Research Institute**, 1984, (2): 1—3.
- [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-layered ground and its applications[J]. **Chinese Journal of Geotechnical Engineering**, 1994, 16(5): 24—35.

关于第十三届国际岩石力学大会论文摘要的征文通知

第十三届国际岩石力学大会将于 2015 年 5 月 10~13 日在加拿大蒙特利尔召开。本届会议由国际岩石力学学会主办, 国际岩石力学学会加拿大国家小组承办。国际岩石力学大会是国际上最高水平的岩石力学与岩石工程界的学术大会, 每四年举办一次。本届会议的主题: 岩石力学应用和理论的创新。

主要议题: 地球物理学在岩石力学中的应用; 岩石力学可行性: 增强现实的范围, 虚拟现实和人工智能; 岩石爆破技术在岩石开挖和钻探的应用; 断裂力学和断裂传播; 破碎岩石和岩体不连续; 地面冻结; 高温地质力学; 地应力测量; 实验室和现场岩石特征和造型; 数值分析、岩石本构模型或过程; 预测和建模; 遥感和地震活动; 储层地质力学; 岩石力学的风险评估; 岩石物理模型增强烃开采; 不确定性在岩石工程设计的特性; 边坡稳定和滑坡; 稳定和挖掘支持; 沉降的预测和减轻其影响; 地下储存石油、天然气、二氧化碳和核废物处置等。

大会组委会正在征集论文, 请广大会员根据组委会对论文摘要征集的要求, 积极投稿, 充分反映我国继召开第十二届国际岩石力学大会后的岩石力学领域的新进展和新成果, 现将有关事项通知如下:

论文摘要提交要求: (1) 所提交的论文摘要必须使用大会论文模板(见中国岩石力学与工程学会网站)。(2) 论文摘要内容最多不超过 500 字(英文), 包括两个图表。论文摘要必须于 2014 年 5 月 1 日在大会网上提交申请, 网址为 <http://www.isrm2015.com/Page/PageContent/AbstractSubmission>。(3) 论文作者必须于 2015 年 1 月 15 日之前全额缴纳注册费。

(4) 录入大会报告和论文集的论文作者均须缴纳 825 美元的注册费(包括主要作者或者报告人是学生身份的)。如果主要作者或者报告人支付了 825 美元的注册费, 第二作者或报告人是学生身份的, 会议注册费为 350 美元。

重要日期: (1) 摘要提交截止日期为 2014 年 5 月 1 日; (2) 摘要录用通知为 2014 年 7 月 1 日; (3) 论文全文提交截止日期为 2014 年 9 月 1 日; (4) 复审截止日期为 2014 年 11 月 1 日; (5) 作者缴纳注册费截止为 2015 年 1 月 15 日; (6) 论文最终修订截止为 2015 年 1 月 15 日。

有关论文及本届大会的相关信息, 可登陆大会网站查询。如有其它问题, 也可联系我学会国际部。

国际部联系方式 电话: 82999164 冯婷 82998163 徐文立 E-mail: csrme@163.com

(摘自 中国岩石力学与工程学会网站)