

DOI: 10.11779/CJGE202203015

堆载-真空联合预压下的未打穿竖井地基固结理论

田 乙^{1,2}, 吴文兵^{*1,2,3}, 张 霖⁴, 蒋国盛¹, 宗梦繁^{1,2}, 梅国雄^{1,3}

(1. 中国地质大学工程学院, 湖北 武汉 430074; 2. 中国地质大学浙江研究院, 浙江 杭州 311305; 3. 广西大学工程防灾与结构安全教育部重点实验室, 广西 南宁 530004; 4. 中冶成都勘察研究总院有限公司, 四川 成都 610023)

摘 要: 针对现有未打穿竖井地基固结计算方法存在的不足, 提出一种固结度简化计算方法, 将未打穿竖井地基分成包含竖井和不包含竖井的两层土体分别进行计算。该方法基于连续排水边界条件的思想, 考虑了上下层土体间的孔压连续性。在堆载-真空联合预压下分别推导得到顶面排水且底面排水 (PTPB) 和顶面排水且底面不排水 (PTIB) 条件下的超静孔隙水压力和平均固结度解析解。通过与现有近似法和半解析解的对比分析, 验证了本文解答的合理性。基于所得解, 探究了堆载-真空联合预压下的未打穿竖井地基的固结性状。结果表明, 竖井贯入度越大, 土体整体固结速率越快; 在考虑真空预压的 PTPB 条件下, 下卧层土体内的真空负压沿深度向下衰减。

关键词: 软土地基; 未打穿竖井; 固结; 真空预压; 固结度

中图分类号: TU433

文献标识码: A

文章编号: 1000-4548(2022)03-0533-08

作者简介: 田 乙(1995—), 男, 博士研究生, 主要从事软土地基固结理论方面的研究。E-mail: tianyibox@163.com。

Consolidation theory of soft foundation with partially penetrating vertical drains under surcharge-vacuum preloading

TIAN Yi^{1,2}, WU Wen-bing^{1,2,3}, ZHANG Lin⁴, JIANG Guo-sheng¹, ZONG Meng-fan^{1,2}, MEI Guo-xiong^{1,3}

(1. Faculty of Engineering, China University of Geosciences, Wuhan 430074, China; 2. Zhejiang Institute, China University of Geosciences, Hangzhou 311305, China; 3. Key Laboratory of Disaster Prevention and Structural Safety, Ministry of Education, Guangxi University, Nanning 530004, China; 4. Chengdu Surveying Geotechnical Research Institute Co., Ltd. of MCC, Chengdu 610023, China)

Abstract: Due to the limitations of the existing methods, a simplified method for calculating the consolidation degree for the soft foundation with partially penetrating vertical drains is devised, in which the soil is divided into two layers: an upper layer with vertical drain and a lower layer without vertical drain. The proposed method accounts for the continuity of pore-water pressure between the upper and lower soil layers using the continuous drainage boundary condition. Under a surcharge-vacuum combined load, the analytical solutions to the excess pore-water pressure and consolidation degree are derived based on pervious top with pervious bottom (PTPB) and pervious top with impervious bottom (PTIB) conditions, respectively. The rationality of the present solution is verified by comparing it with the existing simplified methods and semi-analytical solutions. On basis of the present solution, the consolidation behaviors of soft foundation with partially penetrating vertical drains under surcharge-vacuum preloading are investigated. The results show that the whole consolidation rate becomes quick with the increase of penetration degree. When considering the vacuum preloading under PTPB condition, the vacuum negative pressure has attenuation along depth in the lower soil layer.

Key words: soft foundation; partially penetrating vertical drain; consolidation; vacuum preloading; consolidation degree

0 引 言

随着中国的海洋强国战略部署的推进, 吹沙造陆工程日益增多, 对吹填后的软基处理技术和理论要求也随之提高。目前, 竖井法是最经济有效的软基处理办法之一, 相关固结理论亟待完善。关于未打穿竖井地基的固结问题, 学者们做了大量的研究工作, 但至今还未能得到一个精确又实用的固结度计算方法。

基于来自上海主题公园地基处理项目的大量监测

数据, Chen 等^[1]研究表明: 对于竖井处理的深厚软土固结问题, 竖井下部的固结沉降不可忽略。在未打穿竖井地基中, 对竖井贯穿的上层土体的固结度计算, 现有竖井固结理论已满足需求, 而对于如何很好地考

基金项目: 国家自然科学基金项目 (51878185, 52178321); 浙江省自然科学基金杰出青年项目 (LR21E080005); 中国地质大学 (武汉) 大学生自主创新启航项目 (1910491A15)

收稿日期: 2021-04-26

***通信作者** (E-mail: zjuwwb1126@163.com)

虑下卧层土体的固结这个问题,学者们众说纷纭,提出多种实用的近似算法,以及较为精确的解析方法。根据张玉国等^[2]的总结,现有未打穿竖井地基固结度的近似计算方法主要有 Hart 法^[3]、国内常用简化法、陈根媛双层地基法^[4]、谢康和改进法^[5]。其中, Hart 法、国内常用简化法和谢康和改进法基于同一个简化的固结度公式,主要区别在于下卧层土体固结的竖向排水距离取值不同。这 3 种近似法形式简洁,工程实用性强,但其计算精度仍很难得到保证。根据陈根媛^[4]对砂井固结计算的改进建议,张玉国等^[2]将砂井范围内的地基三维固结进行等效换算,求出等效的一维固结系数,然后将整个地基视为一个双层地基,按照双层地基固结问题进行等效计算,该方法也被称为“双层地基法”。采用“双层地基法”可得到相对简单的固结度计算公式,但是在其等效转换过程中,采用的三维固结度公式是一个简化的经验公式,一维固结度公式也是一个简化的普遍形式,并不是精确公式,所以难免会造成等效固结系数的计算误差。此外, Ong 等^[6]为未打穿排水板地基固结问题提出了一种简化的计算方法,该方法将排水板范围内的土体固结视为 PTIB (顶部排水,底部不排水) 条件下的轴对称固结问题,同时将不包含排水板的下卧层土体固结视为顶部排水的一维固结问题,然后,采用 Terzaghi 一维固结理论解答计算下层土体的固结度。为了修正由假设边界条件带来的误差, Ong 等^[6]结合数值计算结果提出一个固结度修正系数,但该方法仍存在未能考虑真空预压的作用、未考虑上下土层间的孔压连续性的不足。

在未打穿竖井地基固结的精确解析方面,学者们也做了大量工作。谢康和等^[7]考虑下卧层中发生三维渗流,并在该层土中设置虚拟排水井,求解得到未打穿地基固结解析解。基于此虚拟砂井法,郭彪等^[8]考虑不同的涂抹区渗透系数变化模式,研究了未打穿砂井地基的固结问题; Geng 等^[9]应用 Laplace 变换半解析方法分析了真空-堆载联合预压下的未打穿竖井地基固结问题。Nghia 等^[10-11]考虑排水板底部锚定板的不透水特性,将排水板底部设置为不透水边界,并结合上下土层间的渗流连续性条件,先后推导出堆载预压以及堆载联合真空预压下的未打穿竖井地基固结半解析解。Chen 等^[12]在自由应变条件下推导了未打穿竖井地基固结问题的半解析解,其中,为了方便求解,对涂抹效应进行了等效转化,并且忽略了固结模型中竖井正下方土体部分。以上解析方法虽然能够得到精确的解析解及半解析解,但因解答的形式复杂,导致工程实用性受限。此外,学者们也应用有限元方法

(FEM) 来分析未打穿竖井地基固结问题。Indraratna 等^[13]采用数值方法分析了未打穿排水板和加载形式对排水板地基固结的影响, Jang 等^[14]采用有限元分析方法研究了未打穿竖井地基的长期沉降特性。相较而言,有限元虽功能强大,但应用门槛较高。

综上,现有未打穿竖井地基固结解法中,存在以下问题: ①大部分近似解法过于简化,不能较真实反映未打穿竖井地基的固结性状,计算精度有待商榷; ②解析解和半解析解的形式十分复杂,实用性不强。基于此,本文旨在为堆载-真空联合预压下的未打穿竖井地基固结提供一种较简化的计算方法。首先,基于连续排水边界^[15-16]的思想(即,边界处的孔隙水压力同样遵循一般的固结规律,是随时间是变化的),预设下卧层土体的上排水面(竖井底部处)为连续排水边界,分别推导出上下层土的固结解析解;根据上下土层间的孔压连续性,求得预设的界面参数的近似取值。然后,对比分析本文计算方法与现有计算方法的差异。最后,根据本文解答,探究未打穿竖井地基的固结性状。

1 问题描述

在竖井处理软基实践中,竖井往往不能贯穿整个土层。如图 1(a) 所示,土体总厚度为 H , 竖井打设深度为 L , 下卧层厚度为 h 。在土体顶部施加均布荷载 q , 同时通过上部砂垫层向竖井抽真空, 真空负压为 $-p_v$ 。土体的顶面为透水砂垫层, 底面为透水层或不透水层。文中将顶面排水且底面不排水条件记作 PTIB (pervious top and impervious bottom) 条件, 将顶面排水且底面排水记作 PTPB (pervious top and pervious bottom) 条件。

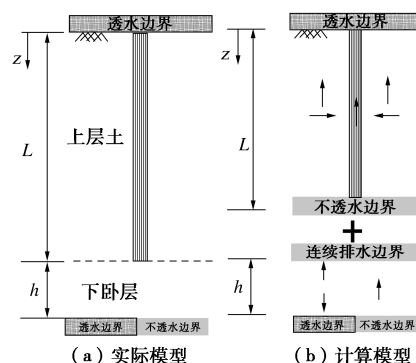


图 1 未打穿竖井地基固结模型

Fig. 1 Consolidation model for ground with partially penetrating vertical drain

如图 1(b) 所示,为了方便计算未打穿竖井地基的固结度,将土层分为带竖井的上层土和不带竖井的下卧层单独进行计算。上层土的平均固结度定义为 U_{r2} , 下卧层土体的平均固结度定义为 U_z , 则整个土体

的平均固结度可表示为^[6]

$$U_{av} = \frac{U_{rz} \cdot L + U_z \cdot h}{L + h} \quad (1)$$

由于上部砂垫层和竖井的存在, 上层土内既发生竖向排水也发生径向排水。一般情况下, 真空预压下的竖井地基中的竖向排水对土体的固结影响较小^[17-18]。在实际工程中, 一般竖井加固的土层厚度比竖井的间距大得多, 故经常忽略竖向排水固结。同时, 根据一维固结理论可知, 土体内的竖向排水随着深度的增加而减弱。因此, 可假定竖井底部处的边界为竖向不排水边界, 即

$$\frac{\partial u_1}{\partial z} \Big|_{z=L} = 0 \quad (2)$$

式中, u_1 为上层土内的超孔隙水压力。

如图 1(b) 所示, 对于下卧土层, 假定仅发生竖向排水, 但其顶面 (竖井底部处) 排水条件不明确, 并不是完全透水边界, 而是孔压随时间变化的。根据连续排水边界的原理^[15-16], 可将下卧层顶面处的超孔隙水压力设定为随时间逐渐消散的形式:

$$u_2 \Big|_{z=L} = (q + p_v) \exp(-\alpha T_v) - p_v \quad (3)$$

式中, u_2 为下卧层中的超孔隙水压力, α 为界面参数。 $T_v = C_v t / h^2$ 为竖向固结时间因子, C_v 为竖向固结系数, t 为固结时间。由式 (3) 可看出, 下卧层顶面处的超孔隙水压力在初始时刻为 q , 随着时间逐渐消散, 最终达到施加的真空负压 $-p_v$, 此预设边界符合实际固结规律。

在本文拟求解的单井固结模型中, 竖井半径为 r_d , 单个竖井影响区域半径为 r_e , 竖井周围涂抹区半径为 r_s 。其它基本假设如下:

- (1) 土体为饱和土体, 土体内的固相和液相不可压缩。
- (2) 土体为线弹性体, 土体的压缩系数始终不变, 且不考虑土体的侧向变形。
- (3) 土体内的渗流遵循达西定律, 且渗透系数在固结过程中恒定不变。
- (4) 土体变形满足等应变条件。

2 固结解析解

上层土的固结是考虑径、竖向排水的轴对称固结问题, 其固结微分方程^[19]可表示为

$$\frac{\partial u_1}{\partial t} = C_h \left(\frac{1}{r} \frac{\partial u_1}{\partial r} + \frac{\partial^2 u_1}{\partial r^2} \right) + C_v \frac{\partial^2 u_1}{\partial z^2} \quad (4)$$

式中, u_1 为上层土中的超孔隙水压力, C_h 为径向固结系数, r 为径向坐标。

边界条件为

$$\left. \begin{aligned} u_1 \Big|_{r=r_d} &= -p_v; \quad \frac{\partial u_1}{\partial r} \Big|_{r=r_e} = 0, \\ u_1 \Big|_{z=0} &= -p_v; \quad \frac{\partial u_1}{\partial z} \Big|_{z=L} = 0. \end{aligned} \right\} \quad (5)$$

初始条件为

$$u_1(r, 0) = q \quad (6)$$

基于 Rujikiatkamjorn 等^[20]的求解方法, 在等应变条件下, 求解式 (4), 可得到深度 z 处的平均超孔隙水压力 \bar{u}_1 为

$$\bar{u}_1 = (q + p_v) \sum_{m=1}^{\infty} \frac{2}{M} \sin\left(\frac{Mz}{L}\right) \exp\left[-\left(\frac{8}{\mu} + \frac{4M^2 r_e^2}{L^2 C_{hv}}\right) T_h\right] - p_v \quad (7)$$

式中, $M = \frac{2m-1}{2} \pi$, $T_h = \frac{C_h}{4r_e^2} t$, $\mu = \ln \frac{n}{s} + \kappa \ln s - \frac{3}{4} +$

$\pi \frac{2k_h}{3q_w} L^2$ 。其中, 无量纲参数定义为: $n = r_e / r_d$, $s = r_s / r_d$, $C_{hv} = C_h / C_v$, $\kappa = k_h / k_s$ 。 q_w 为竖井单位时间内的通水量, 反映竖井的井阻效应。

上部土层的平均固结度可表示为^[20]

$$U_{rz} = 1 - \sum_{m=1}^{\infty} \frac{2}{M^2} \exp\left[-\left(\frac{8}{\mu} + \frac{4M^2 R_e^2}{L^2 C_{hv}}\right) T_h\right] \quad (8)$$

对于下卧土层的一维固结问题, 其固结微分方程可表示为

$$\frac{\partial \bar{u}_2}{\partial t} = C_v \frac{\partial^2 \bar{u}_2}{\partial z^2} \quad (9)$$

式中, \bar{u}_2 为下卧层内任意深度处的平均超孔隙水压力。

PTPB 条件下, 下卧层土体边界条件可以表示为

$$\left. \begin{aligned} \bar{u}_2 \Big|_{z=L} &= (q + p_v) \exp(-\alpha t) - p_v, \\ \bar{u}_2 \Big|_{z=H} &= 0. \end{aligned} \right\} \quad (10)$$

PTIB 条件下, 下卧层土体边界条件可以表示为

$$\left. \begin{aligned} \bar{u}_2 \Big|_{z=L} &= (q + p_v) \exp(-\alpha t) - p_v, \\ \frac{\partial \bar{u}_2}{\partial z} \Big|_{z=H} &= 0. \end{aligned} \right\} \quad (11)$$

初始条件为

$$\bar{u}_2(z, 0) = q \quad (12)$$

下卧层的土体平均固结度可表示为

$$U_z = \frac{\int_L^H (q - \bar{u}_2) dz}{h(q + p_v)} \quad (13)$$

采用分离变量法求解式 (9), 可得 PTPB 条件下的下卧层内超孔隙水压力和平均固结度解析解为

$$\bar{u}_2 = \sum_{m=1}^{\infty} \frac{2}{m\pi} \frac{(q + p_v)\alpha}{(m\pi)^2 - \alpha} \exp(-\alpha T_v) \sin\left[\frac{m\pi(z-L)}{h}\right] -$$

$$\begin{aligned} & \sum_{m=1}^{\infty} (-1)^m \frac{2q}{m\pi} \exp[-(m\pi)^2 T_v] \sin\left[\frac{m\pi(z-L)}{h}\right] - \\ & \sum_{m=1}^{\infty} \frac{2}{m\pi} \frac{(q+p_v)\alpha}{(m\pi)^2 - \alpha} \exp[-(m\pi)^2 T_v] \sin\left[\frac{m\pi(z-L)}{h}\right] + \\ & \frac{H-z}{h} [(q+p_v)\exp(-\alpha T_v) - p_v] \quad , \quad (14) \\ & U_z = 1 - \frac{1}{2} \frac{p_v}{(q+p_v)} - \frac{1}{2} \exp(-\alpha T_v) - \\ & \sum_{m=1}^{\infty} \frac{1}{M^2} \frac{\alpha}{4M^2 - \alpha} \exp(-\alpha T_v) - \\ & \sum_{m=1}^{\infty} \frac{1}{M^2} \frac{q}{(q+p_v)} \exp[-4M^2 T_v] + \\ & \sum_{m=1}^{\infty} \frac{1}{M^2} \frac{\alpha}{4M^2 - \alpha} \exp[-4M^2 T_v] \quad , \quad (15) \end{aligned}$$

式中, $T_v = C_v t / h^2$ 。

同理, PTIB 条件下的下卧层内超孔隙水压和平均固结度解析解为

$$\begin{aligned} \bar{u}_2 = & \sum_{m=1}^{\infty} \frac{2}{M} \frac{(q+p_v)\alpha}{M^2 - \alpha} \exp(-\alpha T_v) \sin\left[\frac{M(z-L)}{h}\right] - \\ & \sum_{m=1}^{\infty} \frac{2}{M} \frac{(q+p_v)\alpha}{M^2 - \alpha} \exp(-M^2 T_v) \sin\left[\frac{M(z-L)}{h}\right] + \\ & (q+p_v)\exp(-\alpha T_v) - p_v \quad , \quad (16) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} U_z = & 1 - \exp(-\alpha T_v) - \sum_{m=1}^{\infty} \frac{2}{M^2} \frac{\alpha}{M^2 - \alpha} \exp(-\alpha T_v) + \\ & \sum_{m=1}^{\infty} \frac{2}{M^2} \frac{\alpha}{M^2 - \alpha} \exp(-M^2 T_v) \quad . \quad (17) \end{aligned}$$

超孔隙水压力在上、下两层土的交界面处应满足连续性条件, 即

$$\bar{u}_1|_{z=L} = \bar{u}_2|_{z=L} \quad . \quad (18)$$

需要说明的是: 本文的简化计算模型在上下土层界面处仅满足孔压连续条件, 并不完全满足渗流连续性。

将式(7)和式(14)(或式(16))带入式(18)中, 得

$$\exp(-\alpha T_v) = \sum_{m=1}^{\infty} \frac{2\sin(M)}{M} \exp\left[-\left(\frac{8}{\mu} + \frac{4M^2 r_e^2}{L^2 C_{hv}}\right) T_h\right] \quad . \quad (19)$$

根据式(19)即可确定预设的界面参数 α 。一般情况下, 竖井底面处的竖向排水距离远大于径向排水距离, 所以在此处的竖向排水对土体固结影响很小。为了方便得到界面参数 α 的表达式, 可以忽略竖井底面处($z=L$)土体内竖向排水项, 即令 $C_v=0$, 则式(19)可转化为

$$\exp(-\alpha T_v) \approx \sum_{m=1}^{\infty} \frac{2\sin(M)}{M} \exp\left(-\frac{8}{\mu} T_h\right) = \exp\left(-\frac{8}{\mu} T_h\right) \quad (20)$$

进而, 由式(20)可得界面参数的近似取值为

$$\alpha = \frac{2h^2 C_{hv}}{\mu r_e^2} \quad , \quad (21)$$

为了验证该近似界面参数取值的合理性, 令

$$y_1 = \exp(-\alpha T_v) \quad , \quad (22)$$

$$y_2 = \sum_{m=1}^{\infty} \frac{2\sin(M)}{M} \exp\left[-\left(\frac{8}{\mu} + \frac{4M^2 r_e^2}{L^2 C_{hv}}\right) T_h\right] \quad . \quad (23)$$

在不同的竖向固结参数下, 比较 y_1 和 y_2 曲线。为了保证分析结果的普适性, 引入无量纲参数: 固结时间因子 T_h , 竖径向排水距离比 L/r_e 。如图2所示, 当径竖向土体固结系数比 C_{hv} 大于1时(图中取1和10), y_1 与 y_2 完全重合, 说明此时以上界面参数的近似取值完全可以满足等式(19)。当 C_{hv} 取0.1时, y_1 与 y_2 之间有一定差异, 且 L/r_e 取20, 15, 10时差距逐渐增大, 但 L/r_e 取20和15时, 差距较小, 基本可以忽略。一般而言, 土体的径竖向土体固结系数比 C_{hv} 是大于1的。另一方面, 在排水板地基设计中, 排水板打设间距一般在1~1.5 m, 打设深度往往超过打设间距的10倍。所以, 上文界面参数的近似取值完全满足 C_{hv} 大于1的工况, 同时满足绝大多数实际工况。

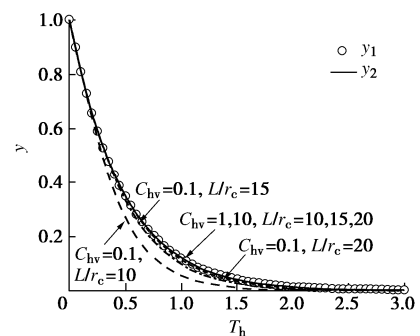


图2 界面参数近似取值的合理性验证

Fig. 2 Verification of rationality of interface parameter value

3 对比分析

如前文所述, 现有未打穿竖井地基的固结度计算方法有近似法、解析法和有限元(FEM)法。近似法中的Hart法、国内常用简化法、谢康和改进法是目前最常见的计算方法, 这3种近似计算方法的固结度计算公式一致, 主要区别在于下卧层土体的竖向排水距离取值不一样, 具体的公式表达以及参数取值参见文献[2, 7]。此外, Ong等^[6]应用有限元方法改进了传统的近似计算方法, 提出一个下卧层土体固结度修正系数, 并得到该修正系数的分段表达式, 下文将该方法称为Ong修正法。Ong修正法虽然可以得到较精确的平均固结度, 但其没有考虑到真空预压的作用, 也无

法反映出土体内的孔压情况。解析法可以大致概括为: 等效双层地基法^[2, 4]、虚拟竖井法^[7-9]、下层土一维固结假设法^[10-12]。耿雪玉等^[9]基于虚拟竖井法, 推导得到堆载联合真空预压下的未打穿竖井地基固结半解析解, Nghia 等^[10-11]基于下层土一维固结假设, 得到相应的固结半解析解。这两个解答在理论上满足严密的力学规律, 相较于近似法而言, 其计算结果更精确, 但其形式十分复杂。

下文将本文所得解答与以上 3 种近似计算方法、Ong 修正法^[6]、Geng 解^[9]以及 Nghia 解^[10]进行对比, 以验证本文简化方法的合理性。

图 3 和图 4 显示了基于不同近似法得到的固结度曲线 (仅考虑堆载预压), 其中, 图 3 为 PTPB 条件下的结果, 图 4 为 PTIB 条件下的结果。计算参数参照文献^[6]取值: $r_d=0.03$ m, $r_e=0.5$ m, $H=10$ m, $k_h=4.85 \times 10^{-6}$ m/d, $m_v=10^{-4}$ m²/kN, 其余参数如图中所示。从整体上看, 以上 3 种近似法较为接近, 但在 $U_{av}>0.8$ 时, Hart 法偏离明显; 本文解与 Ong 修正法^[6]较为接近, 但基于本文解得到的平均固结度始终略小于 Ong 修正法得到的平均固结度, 差距小于 9%; 在 $U_{av}>0.5$ 时, 本文解、国内常用简化法、谢康和改进法、Ong 修正法都相互接近。

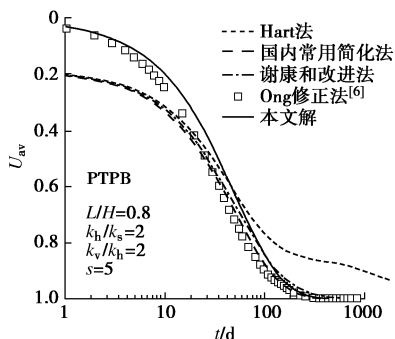


图 3 PTPB 条件下本文解与 4 种近似法的比较

Fig. 3 Comparison between proposed method and existing approximate methods under PTPB condition

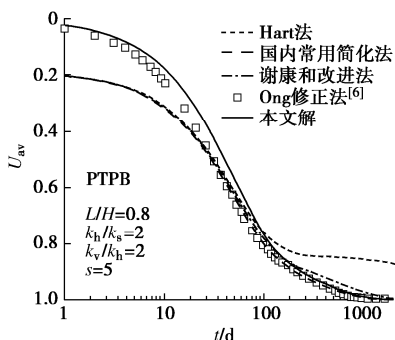


图 4 PTIB 条件下本文解与 4 种近似法的比较

Fig. 4 Comparison between proposed method and existing approximate methods under PTIB condition

图 5 为基于 Nghia 等^[10]的半解析解和本文解得到的固结度曲线 (仅考虑堆载预压), 相关参数参照文献^[10]取值为: $r_d=0.05$ m, $H=10$ m, $k_h=0.0315$ m/a, $m_v=10^{-3}$ m²/kN, 其余参数如图中所示。从图中可看出, 在 PTIB 条件下, 当 $U_{av}<0.6$ 时, 本文解与 Nghia 解几乎重合, 但 $U_{av}>0.6$ 时, 本文解大于 Nghia 解, 两者之间的差距始终不超过 8%。在 PTPB 条件下, 本文解答与 Nghia 解基本保持一致。

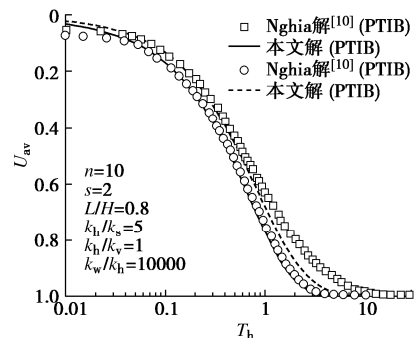


图 5 本文解与 Nghia 解的比较

Fig. 5 Comparison between proposed and Nghia's solutions

基于文献^[9]的参数取值: $r_d=0.05$ m, $H=10$ m, $k_h=10^{-10}$ m/s, $m_v=10^{-3}$ m²/kN, $p_v=q=40$ kPa, 其余参数如图 6 所示。在 PTPB 条件下, 图 6 给出了本文解与 Geng 等^[9]的半解析解对比结果。可以看出, 当贯入度 $L/H=0.6$ 时, 在 $U_{av}<0.5$ 的阶段, 本文解与 Geng 解几乎重合; 当贯入度 $L/H=0.9$ 时, 在 $U_{av}<0.9$ 的阶段, 本文解与 Geng 解几乎一致; 在其余阶段, 本文解略大于 Geng 解, 且差距不超过 5%。另外, 据图 6 可知, 当考虑真空预压时, 平均固结度无法达到 1, 说明真空负压在下层土中存在衰减 (泄漏)。此现象与文献^[9]中所得一致, 但本文解答所得的最终固结度大于 Geng 解的最终固结度。通过以上对比分析可知, 本文提出的未打穿竖井地基固结度简化计算方法与 Ong 修正法^[6]、Geng 解^[9]以及 Nghia 解^[10]都十分接近, 这验证了本文的假设条件以及求解过程的合理性。

4 未打穿竖井地基固结性状分析

未打穿竖井地基之特点在于砂井未贯穿整个土层, 故对贯入度 L/H 的参数敏感性分析尤为必要。此外, 边界条件的不同也造成了固结解答的差别, 下文也将分析不同边界条件下 (PTPB 和 PTIB) 的未打穿竖井地基的固结性状。下文算例中, 基本参数如下: $r_d=0.05$ m, $n=10$, $s=3$, $H=10$ m, $k_h=10^{-10}$ m/s, $m_v=10^{-3}$ m²/kN, $k_h/k_s=3$, $k_h/k_v=2$, $p_v=80$ kPa, $q=100$ kPa, 其余参数在图中给出。

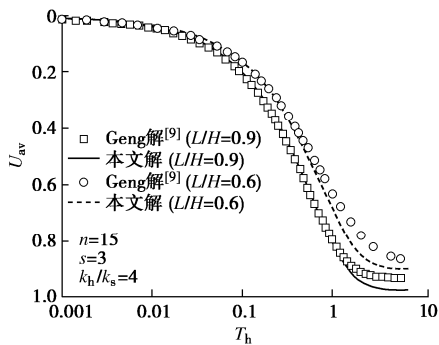


图 6 本文解与 Geng 解的比较

Fig. 6 Comparison between proposed and Geng's solutions

图 7 反映了 PTPB 条件下不同贯入度对固结度曲线的影响,从图中可以看出,随着贯入度 L/H 的增大,土体的整体固结速率加快。在底部透水的情况下,由于真空负压在下卧层土体中沿深度向下会发生衰减(最终状态),因此按式(13)计算的固结度将无法达到 1。

由图 7 也可得出,最终固结度随着贯入度的增大而增大。需要说明的是,当贯入度 $L/H=1$ 时,下层土体厚度为零,此时整个土体的边界条件为 PTIB,故最终固结度达到 1。

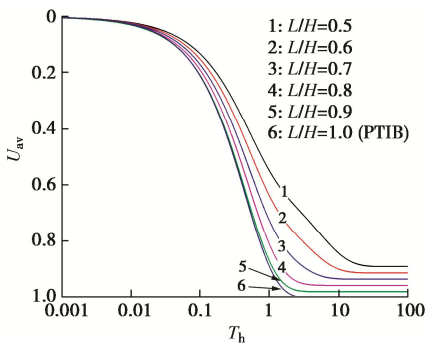


图 7 PTPB 条件下不同贯入度 L/H 的固结度曲线

Fig. 7 Curves of consolidation degree for different penetration ratios L/H under PTPB condition

图 8 为 PTIB 条件下的固结度曲线,由图可知,竖井贯入度 L/H 越大,土体整体固结速率越快,且 PTIB 条件下的固结度能达到 1。由图 9 对比以上两种边界条件可知,PTPB 条件下的固结度发展较快,较先完成固结。当 $U_{av}<0.5$ 时,PTPB 条件下和 PTIB 条件下的固结度差距微小,这是因为此阶段的固结速率是由上层土体的固结主导;当 $U_{av}>0.5$ 时,PTPB 条件下的固结度发展比 PTIB 条件下的固结度发展明显加快,这是因为此阶段的固结逐渐以下卧层的固结为主导,并且底面透水边界可加快下卧层土体的固结。

图 10, 11 分别反映了 PTPB 和 PTIB 条件下的超孔隙水压力随深度的分布曲线。从图中可看出,上层

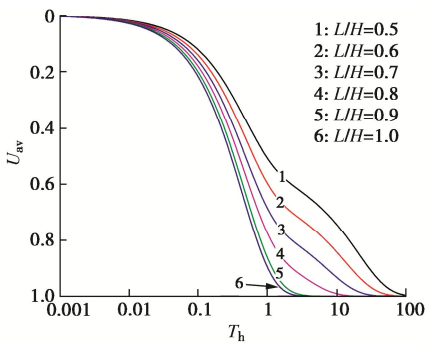


图 8 PTIB 条件下不同贯入度 L/H 的固结度曲线

Fig. 8 Curves of consolidation degree for different penetration ratios L/H under PTIB condition

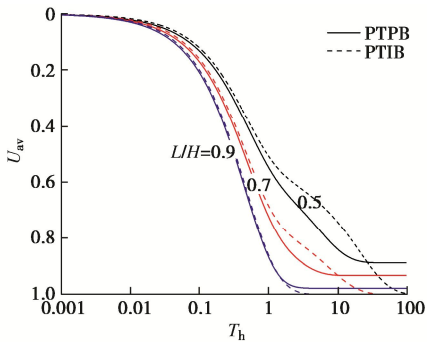


图 9 PTPB 与 PTIB 条件下的固结度曲线对比

Fig. 9 Comparison of consolidation degree between PTPB and PTIB conditions

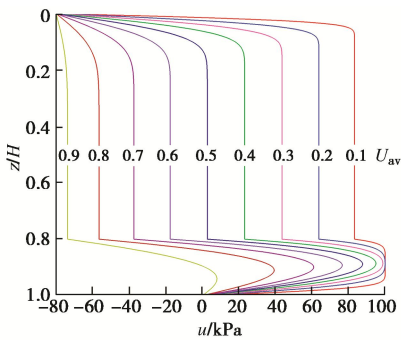


图 10 PTPB 条件下的超孔隙水压力随深度的分布曲线

Fig. 10 Distribution curves of excess pore-water pressure along depth under PTPB condition

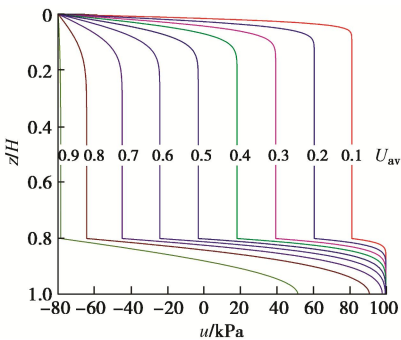


图 11 PTIB 条件下的超孔隙水压力随深度的分布曲线

Fig. 11 Distribution curves of excess pore-water pressure along depth under PTIB condition

土体和下卧层土体内的超孔隙水压力随深度分布规律有明显差异。在上层土体内, 靠近顶面位置的超孔隙水压力随深度逐渐增大, 而在相对远离顶面位置的超孔隙水压力随深度变化很小, 这说明土体深度越大, 竖向排水的作用越小。在 PTPB 条件下, 下卧层土体内的超孔隙水压力在固结过程中随深度呈“凸”形分布, 在土体底面始终为零, 但由于竖井底面处 ($z=L$) 的超孔隙水压力是渐变的, 所以下卧层土体内的超孔隙水压力分布并不对称。在 PTIB 条件下, 下卧层土体内的超孔隙水压力随深度逐渐增大, 土体底面超孔隙水压力随着固结度的发展逐渐减小。从图 10 和图 11 中也可以看出, 在竖井底面处 ($z=L$), 上下层土体交界 (竖井底部) 处的超孔隙水压力在深度方向上是连续的, 这也是 Ong 等^[6]的修正法不能呈现的效果。

5 结 论

(1) 本文针对堆载-真空联合预压下的未打穿竖井地基固结问题, 得到土体内的超孔隙水压力解析解及相应的平均固结度解析解, 提出了一种较简化的固结度计算方法。

(2) 本文解与常见的 3 种近似法 (Hart 法、国内常用简化法、谢康和改进法) 在固结前期 ($U_{av}<0.5$) 的差距较大, 与较为精确的 Ong 修正法始终保持接近, 差距不超过 9%; 总体而言, 本文解答与 Nghia 解以及 Geng 解都十分吻合。此对比结果验证了本文计算方法的合理性。

(3) 与现有简化法相比, 本文简化法可以一定程度考虑上下层间的孔压连续性, 更符合真实物理规律, 且不需要对下卧层的厚度和固结系数进行修正; 与现有较精确的半解析解相比, 本文简化解具有形式简洁、便于实际应用的优势。

(4) 竖井贯入度 L/H 越大, 土体整体固结速率越快; 在考虑真空预压时, PTPB 条件下, 下卧层土体内的真空负压沿深度向下逐渐衰减。

参考文献:

- [1] CHEN L Z, GAO Y B, ELSAYED A, et al. Soil consolidation and vacuum pressure distribution under prefabricated vertical drains[J]. *Geotechnical and Geological Engineering*, 2019, **37**(4): 3037 - 3048.
- [2] 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**(22): 4164 - 4164. (ZHANG Yu-guo, XIE Kang-he, ZHUANG Ying-chun, et al. Calculation and analysis of consolidation theory of ground by partially penetrating sand drain[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2005, **24**(22): 4164 - 4164. (in Chinese))
- [3] HART E G, KONDRER R L, BOYER W C. Analysis for partially penetrating sand drains[J]. *Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division*, 1958, **84**(4): 1812-1 - 1812-15.
- [4] 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): 20 - 32. (CHEN Gen-yuan. One-dimensional consolidation of layered systems and a suggestion for improving calculation of sand-drained subsoil[J]. *Journal of Nanjing Hydraulic Research Institute*, 1984(2): 20 - 32. (in Chinese))
- [5] 谢康和. 砂井地基固结理论、数值分析与优化设计[D]. 杭州: 浙江大学, 1987. (XIE Kang-he. Sand drained ground: analytical and Numerical Solutions of Consolidation and Optimal Design[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 1987. (in Chinese))
- [6] ONG C Y, CHAI J C, HINO T. Degree of consolidation of clayey deposit with partially penetrating vertical drains[J]. *Geotextiles and Geomembranes*, 2012, **34**: 19 - 27.
- [7] 谢康和, 周开茂. 未打穿竖向排水井地基固结理论[J]. *岩土工程学报*, 2006, **28**(6): 6 - 11. (XIE Kang-he, ZHOU Kai-mao. Consolidation theory for soft soil with partially penetrated vertical drains[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2006, **28**(6): 6 - 11. (in Chinese))
- [8] 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. (in Chinese))
- [9] GENG X Y, INDRARATNA B, RUJIKIATKAMJORN C. Effectiveness of partially penetrating vertical drains under a combined surcharge and vacuum preloading[J]. *Canadian Geotechnical Journal*, 2011, **48**(6): 970 - 983.
- [10] NGHIA N T, LAM L G, SHUKLA S K. A new approach to solution for partially penetrated prefabricated vertical drains[J]. *International Journal of Geosynthetics and Ground Engineering*, 2018, **4**(2): 1 - 17.
- [11] NGHIA N T, CUONG L T, LAM L G, et al. Solution for partially penetrated vertical drain with anchor plate[J]. *Geotechnical Engineering*, 2020, **51**(4): 89 - 97.
- [12] CHEN Z, NI P P, MEI G X, et al. Semi-analytical solution for consolidation of ground with partially penetrating pvds under

- the free-strain condition[J]. Journal of Engineering Mechanics, 2021, **147**(2): 04020148.
- [13] INDRARATNA B, RUJIKIATKAMJORN C. Effects of partially penetrating prefabricated vertical drains and loading patterns on vacuum consolidation[C]// GeoCongress 2008, 2008, New Orleans.
- [14] JANG W Y, CHUNG S G. Long-term settlement analysis of partially improved thick clay deposit[J]. Geotextiles and Geomembranes, 2014, **42**(6): 620 - 628.
- [15] 梅国雄, 夏 君, 梅 岭. 基于不对称连续排水边界的太沙基一维固结方程及其解答[J]. 岩土工程学报, 2011, **33**(1): 28 - 31. (MEI Guo-xiong, XIA Jun, MEI Ling. Terzaghi's one-dimensional consolidation equation and its solution based on asymmetric continuous drainage boundary[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2011, **33**(1): 28 - 31. (in Chinese))
- [16] TIAN Y, WU W B, JIANG G S, et al. One-dimensional consolidation of soil under multistage load based on continuous drainage boundary[J]. International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics, 2020, **44**: 1170 - 1183.
- [17] INDRARATNA B, RUJIKIATKAMJORN C, SATHANANTHAN I. Analytical and numerical solutions for a single vertical drain including the effects of vacuum preloading[J]. Canadian Geotechnical Journal, 2005, **42**(4): 994 - 1014.
- [18] TIAN Y, WU W B, JIANG G S, et al. Analytical solutions for vacuum preloading consolidation with prefabricated vertical drain based on elliptical cylinder model[J]. Computers and Geotechnics, 2019, **116**: 103202.
- [19] BARRON R A. Consolidation of fine-grained soils by drain wells by drain wells[J]. Transactions of the American Society of Civil Engineers, 1948, **113**(1): 718 - 742.
- [20] RUJIKIATKAMJORN C, INDRARATNA B. Analytical solutions and design curves for vacuum-assisted consolidation with both vertical and horizontal drainage[J]. Canadian Geotechnical Journal, 2007, **44**(2): 188 - 200.

第七届全国工程安全与防护学术会议 暨中国岩石力学与工程学会工程安全与防护分会理事会换届会议

2022 年7 月22~24 日·苏州（二号通知）

主办单位：中国岩石力学与工程学会工程安全与防护分会；江苏省岩土力学与工程学会。

承办单位：苏州科技大学。

协办单位：中国岩石力学与工程学会岩石动力学专业委员会；中国地震学会岩土防灾减灾专业委员会；北京建筑大学湘潭大学；三峡大学；江苏省隧道与地下工程技术研究中心；江苏东华测试技术股份有限公司；昆山市建设工程质量检测中心。

会议主题：爆炸冲击防灾减灾新理论、新技术。

会议专题：①深部工程建设灾变机理及其动力学；②岛礁工程长期安全保障理论与技术；③城市地下空间安全评估与民防技术；④偶然爆炸冲击致灾机理与灾害防控；⑤爆炸冲击量测新技术新设备与应用；⑥工程防震新材料、新结构和新技术；⑦新型常规武器毁伤效应与防护技术；⑧地下工程结构与介质相互作用机理。

会议论文内容、格式要求与发表：论文内容要围绕大会主题，提倡实用性、创新性和前瞻性，且在国内外未正式发表过的研究成果，请严格按照《岩石力学与工程学报》征文要求规范编辑全文。会议学术委员会将组织专家对所提交的论文进行审查，并精选一定数量的优秀论文推荐到《岩石力学与工程学报》正刊和增刊（EI 收录）等期刊，通过审稿程序的论文，将在上述期刊正刊或增刊发表。本次学术会议仍对优秀论文进

行评奖。

会议内容：工程安全与防护分会理事会换届会议，工程安全与防护学术交流。

会议重要日程：2022年4月30日论文投稿截止；2022年7月22日报到；2022年7月22日晚上召开会员代表大会及分会常务理事会议；2021年7月22~24日大会学术报告。

会议住宿及交通：会议地点：苏州王府金科大酒店，地址：苏州市虎丘区滨河路1969号。

会议注册标准：正式代表1600元/人；学生代表900 元/人（凭有效学生证）；家属伙食费400元/人。费用包括会议资料、餐饮。会议住宿统一安排，费用自理。会议注册缴费收款账户信息：江苏省岩土力学与工程学会，银行账号：4301 0172 0910 0050 194，开户行：中国工商银行南京市海福巷支行。

会议秘书处联系方式：王源（13951989919），杨露（13601453240），丁雪（17551099920），李晓照（15811102679），夏晨（17701370715），李思为（18020269202），E-mail: aqfhfh@163.com，地址：南京市秦淮区永智路6号中国云计算创新基地B座318，邮编：210001。

（中国岩石力学与工程学会工程安全与防护分会
江苏省岩土力学与工程学会 供稿）