

DOI: 10.16285/j.rsm.2018.1899

初始孔压非均布下一维地基砂垫层优化研究

蒙宇涵^{1,2,3}, 陈 征⁴, 冯健雪⁵, 李红坡^{1,2,3}, 梅国雄^{1,2,3}

(1. 广西大学 工程防灾与结构安全教育重点实验室, 广西 南宁 530004; 2. 广西大学 广西防灾减灾与工程安全重点实验室, 广西 南宁 530004;
3. 广西大学 土木工程学院, 广西 南宁 530004; 4. 武汉大学 水工岩石力学教育部重点实验室, 湖北 武汉 430072;
5. 贵州民族大学 建筑工程学院, 贵州 贵阳 550025)

摘 要: 针对吹填土地基水平排水砂垫层铺设深度优化问题, 建立了初始孔压非均布下含砂垫层地基的一维固结模型, 利用有限 Fourier 正弦变换法得出了超静孔压和地基整体平均固结度的解答并通过退化验证了解答的正确性。采用二分法分析了砂垫层的最优铺设深度随时间的演化规律, 给出了砂垫层最优铺设深度与时间的关系图。研究表明: 在固结初期, 砂垫层宜放置在土中初始超静孔压较大的位置; 在固结后期, 砂垫层的最优设置深度为土体厚度的 $2/3$ (单面排水) 或者 $1/2$ (双面排水) 的位置。以预压地基平均固结度达到 90% 所需时间最短为例, 当初始孔压倒三角形、正三角形与梯形分布时, 单面排水条件下, 应分别在 $0.52H$ 、 $0.72H$ 、 $0.62H$ 倍地基土深度处设置砂垫层; 双面排水条件下, 应分别在 $0.42H$ 、 $0.58H$ 、 $0.46H$ 倍地基土深度处设置砂垫层。最后通过算例分析了当地基土中砂垫层采用最优铺设深度时, 与在中间位置铺设砂垫层、不设砂垫层的情况分别进行对比, 当时间因子取 0.09 时, 地基土平均固结度分别提高 6% 和 54%。

关 键 词: 一维固结; 解析解; 砂垫层铺设深度优化; 初始孔压非均布

中图分类号: TU447

文献标识码: A

文章编号: 1000-7598(2019)12-4793-09

Optimization of one-dimensional foundation with sand blankets under the non-uniform distribution of initial excess pore water pressure

MENG Yu-han^{1,2,3}, CHEN Zheng⁴, FENG Jian-xue⁵, LI Hong-po^{1,2,3}, MEI Guo-xiong^{1,2,3}

(1. Key Laboratory of Disaster Prevention and Structural Safety of Ministry of Education, Guangxi University, Nanning, Guangxi 530004, China;
2. Guangxi Key Laboratory of Disaster Prevention and Structural Safety, Guangxi University, Nanning, Guangxi 530004, China;
3. College of Civil Engineering and Architecture, Guangxi University, Nanning, Guangxi, 530004, China;
4. Key Laboratory of Rock Mechanics in Hydraulic Structural Engineering of Ministry of Education, Wuhan University, Wuhan, Hubei 430072, China;
5. Architectural Engineering College, Guizhou Minzu University, Guiyang, Guizhou, 550025, China)

Abstract: Aiming at the optimal installation of horizontal drainage channels in hydraulic fill reclamation projects, one dimensional consolidation model with drainage channels installed in the foundation which considering the non-uniform distribution of initial excess pore water pressure was established. The analytical solution was obtained using the finite sine Fourier transform method. After verifying the correctness of the solution, the optimal position of the drainage channels under different time factors was solved and also given in the diagram form. The results show that drainage channels should be installed at the depth of soil layer with great excess pore pressure at the early stage of consolidation, and turn to $2H/3$ (PTIB) or $H/2$ of soil (PTPB) at the later stage of consolidation (H is the depth of foundation). In order to save the consolidation time when the degree of consolidation reaches 90%, the optimal installation depth of horizontal drainage channels was $0.52H$, $0.72H$, and $0.62H$ for the single-drainage condition with the distribution of initial excess pore pressure in the inverted triangle, triangle and trapezoidal pattern, respectively. For the double-drainage condition, the optimal installation depth of horizontal drainage channels was $0.42H$, $0.58H$, and $0.46H$, respectively. A practical example shows that the foundation with optimal depth of horizontal drainage channels has higher consolidation degree (6% and 54%) than that with drainage channels installed in $0.5H$ and without drainage channels installed.

Keywords: one-dimensional consolidation; analytical solution; optimal installation of horizontal drainage channels; non-uniform distribution of initial excess pore water pressure

收稿日期: 2018-10-12

基金项目: 国家自然科学基金 (No.51578164, No.41672296, No.51878185); 广西自然科学基金创新研究团队项目 (No.2016GXNSFGA380008); 长江学者 (No.T2014273); 八桂学者 (No.2016A31); 中国国家留学基金 (No.201906660001)。

This work was supported by the National Natural Science Foundation of China (51578164, 41672296, 51878185), the Innovative Research Team Program of Guangxi Natural Science Foundation (2016GXNSFGA380008), the Changjiang Scholars Program of the Ministry of Education of China (T2014273), the Bagui Scholars Program (2016A31) and the China Scholarship Council (CSC) (201906660001).

第一作者简介: 蒙宇涵, 男, 1993 年生, 硕士研究生, 主要从事软土地基固结理论方面的研究。E-mail: mengyuhan@st.gxu.edu.cn

通讯作者: 梅国雄, 男, 1975 年生, 博士, 教授, 博士生导师, 主要从事固结理论和土体基本性质等方面的研究。E-mail: meiguox@163.com

1 引言

排水固结法是处理软土地基的常用方法之一。对于预压地基, 通常会在竖直方向设置排水体, 如: 砂井^[1-2]、塑料排水板^[3]、碎石桩^[4]、预制垂直排水管^[5]等, 关于竖向排水体的研究是较为深入的; 而对于水平方向的排水体, 如: 砂垫层^[6-10]以及其他形式的水平排水体^[11-13]的研究却较少。对于一些填海造陆工程所形成的吹填土软弱地基, 常在地基当中某一深度位置预先埋设一层薄砂层以缩短地基的竖向排水路径从而加速其固结。

目前为止, 对水平排水砂垫层的研究主要有两个方面。一些学者考虑砂垫层和黏土层的厚度、宽度、渗透系数之间的关系, 该关系最先由 Gibson 等^[6]针对软黏土筑堤工程中铺设水平砂垫层以加速黏土土堤固结问题而提出, 其认为砂垫层的渗透系数远远大于待固结土层的渗透系数且假设砂垫层内部的超静孔压沿着厚度均匀分布, 根据渗流连续条件建立了待固结地基顶、底面的边界条件, 之后 Sills^[14]结合 3 个现场试验的实测结果验证了其正确性。Tan 等^[7]结合夹砂层围垦地基的竖向固结问题, 提出了评估砂垫层排水效率的总特征参数 λ 。Nogami 等^[8-9]根据已有的研究利用矩阵传递法计算了水平排水砂垫层对成层土地基固结效率的影响。雷国辉等^[15]推导了含砂垫层地基的二维自由应变固结解析解并分析了待固结土层和砂垫层的渗透系数、厚度以及宽度对地基固结的影响。徐梨丹等^[16]针对天然地基上的水平排水砂垫层, 采用平面应变有限元方法, 研究了地基固结效率与集总参数 λ 的关系。对于实际工程中砂垫层的相关参数设计, 建筑地基处理技术规范^[17]规定, 对于使用预压法处理的地基, 其表面铺设的砂垫层宜采用中粗砂且厚度不应小于 500 mm, 渗透系数宜大于 0.01 cm/s; 对于使用真空和堆载联合预压的地基, 其表面铺设的砂垫层厚度应为 100~300 mm。另外, 还有一些学者考虑排水体的排水能力与地基排水速率的大小关系来设计砂垫层。马国栋^[18]假设砂垫层断面中水头曲线为抛物线形状, 根据排水体的排水能力大于地基排水速率推导了路基坡脚处砂垫层厚度公式。刘吉福^[19]则根据水平排水体排水能力等于地基排水速率的原则分析了各种断面类型的砂垫层不同部位的厚度需求。

以上研究所采用的含砂垫层地基固结模型中, 砂垫层设置于地基表面或沿土体深度方向等间距布置。但砂垫层的最佳设置深度应为土体中超静孔压

达到峰值的位置, 且实际情况下作用于土层的初始超静孔压分布非常复杂, 如土体由于自重应力而产生固结的工况, 初始孔压呈正三角形分布; 又如土体在自重应力作用下尚未固结完成就在其上修建建筑物的工况, 初始孔压呈梯形分布等。孔压峰值面出现在土层中的位置是不确定的, 对于此类情况, 砂垫层的铺设深度如何优化, 很少有相关研究提及。

本文为获得初始孔压非均布下吹填土地基水平排水砂垫层的最优铺设深度, 通过建立含砂垫层地基一维固结方程, 利用有限 Fourier 正弦变换得到固结模型的解析解并验证解的有效性。采用二分法分析砂垫层最优铺设深度随时间的变化规律, 通过算例分析砂垫层采用最优铺设深度时地基固结度的提高幅度。

2 数学模型

2.1 问题描述

在均质饱和黏土层中任意位置铺设水平排水砂垫层的固结计算简图如图 1 所示, 图中 H 为黏土层的总厚度; H_1 为水平排水砂垫层的任意铺设深度; 砂垫层将饱和黏土层分为两层, 第 1 部分土层的超静孔压用 $u_1(z, t)$ 表示, 第 2 部分土层的超静孔压用 $u_2(z, t)$ 表示, z 为土层厚度范围内的任意位置, t 为时间; k_v 和 m_v 分别为黏土层竖向渗透系数和体积压缩系数。

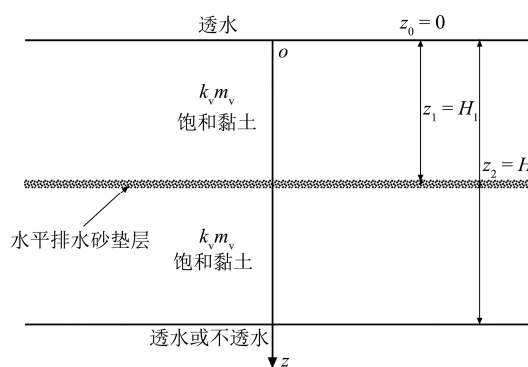


图 1 计算简图

Fig.1 Sketch of simplified computation model

由于作用于饱和土体的初始超静孔压分布非常复杂, 出于实用可以把实际上可能遇到的初始孔压分布近似地分为 3 种工况: 对于无限宽广的水力充填土层, 考虑自重应力下的固结时, 初始孔压即为正三角形分布如图 2(a)所示; 基础底面积较小, 在压缩土层底面的附加应力已经接近于 0 的情况, 即倒三角形分布如图 2(b)所示; 与倒三角形分布相

似,但是在压缩土层底面的附加应力还未接近于 0 的情况,即倒梯形分布如图 2(c)所示,其中, P_T 为土体顶面初始超静孔压, P_B 为土体底面初始超静孔压。

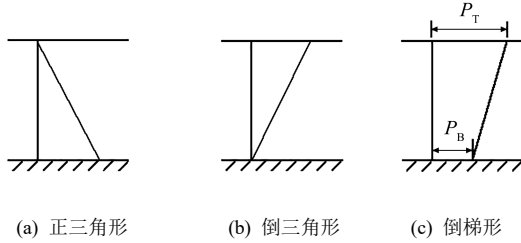


图 2 初始孔压分布

Fig.2 Non-uniform distribution of initial excess pore water pressure along the soil depth

地基的排水条件为单面排水或双面排水。

2.2 基本假定

本文除了采用太沙基一维固结理论的基本假设外,还采用以下假定:

(1) 水平排水砂垫层的厚度与地基土厚度相比忽略不计,且其渗透系数和刚度相对于地基土为无穷大。

(2) 砂垫层只起水平向导水作用,不计砂垫层的竖向渗流。

2.3 固结方程和求解条件

固结微分方程:

$$\frac{\partial u_i}{\partial t} = C_v \frac{\partial^2 u_i}{\partial z^2} \quad (z_{i-1} \leq z \leq z_i, t \geq 0) \quad (1)$$

式中: $i=1,2$; $C_v = k_v / m_v \gamma_w$ 为固结系数, γ_w 为水的重度; u_1 、 u_2 分别表示上下土层土体的超静孔隙水压力; $z_0 = 0$; $z_1 = H_1$; $z_2 = H$ 。

初始条件:

$$u = P_T - \frac{P_T - P_B}{H} z \quad (2)$$

对于地基土单面排水 (PTIB) 情况:

$$u_1|_{z=z_0} = u_1|_{z=z_1} = 0 \quad (3)$$

$$u_2|_{z=z_1} = \frac{\partial u_2}{\partial z} \bigg|_{z=z_2} = 0 \quad (4)$$

对于地基土双面排水 (PTPB) 情况:

$$u_1|_{z=z_0} = u_1|_{z=z_1} = 0 \quad (5)$$

$$u_2|_{z=z_1} = u_2|_{z=z_2} = 0 \quad (6)$$

3 方程解答

3.1 方程的无量纲化

为方便计算,采用无量纲法以消除推导过程中各物理量单位的影响。在本文中,以初始孔压倒梯形分布为例,定义如下无量纲参数:

$$u_D = \frac{u}{P_T}, Z = \frac{z}{H}, T_v = \frac{C_v t}{H^2}, \eta = \frac{P_T - P_B}{P_T} \quad (7)$$

式中: T_v 为时间因子; η 为土层顶面相对于土层底面的超静孔压增量 (即初始孔压倒梯形分布的倒梯形斜边斜率)。

应用以上无量纲变量,控制方程及求解条件转化如下:

控制方程为

$$\frac{\partial u_{Di}}{\partial T_v} = \frac{\partial^2 \bar{u}_{Di}}{\partial Z^2} \quad (Z_{i-1} < Z < Z_i, T_v > 0) \quad (8)$$

式中: $i=1,2$; u_{D1} 、 u_{D2} 分别表示上、下土层土体的超静孔隙水压力; $Z_0 = 0$; $Z_1 = H_1/H$; $Z_2 = 1$ 。

初始超静孔压假设为倒梯形分布,故初始条件为

$$u_{Di} = 1 - \eta Z \quad (Z_{i-1} \leq Z \leq Z_i) \quad (9)$$

对于地基土单面排水 (PTIB) 情况:

$$u_{D1}|_{Z=Z_0} = u_{D1}|_{Z=Z_1} = 0 \quad (10)$$

$$u_{D2}|_{Z=Z_1} = \frac{\partial u_{D2}}{\partial Z} \bigg|_{Z=Z_2} = 0 \quad (11)$$

对于地基双面排水 (PTPB) 情况:

$$u_{D1}|_{Z=Z_0} = u_{D1}|_{Z=Z_1} = 0 \quad (12)$$

$$u_{D2}|_{Z=Z_1} = u_{D2}|_{Z=Z_2} = 0 \quad (13)$$

3.2 超静孔压解答

3.2.1 单面排水条件下地基超静孔压解答

根据边界条件式 (10)、(11) 对控制方程式 (8) 及初始条件式 (9) 作有限 Fourier 正弦变换,得

$$\frac{\partial \bar{u}_{Di}}{\partial T_v} = - \left(\frac{1}{Z_i - Z_{i-1}} M_m^i \right)^2 \bar{u}_{Di} \quad (14)$$

$$\bar{u}_{Di}|_{T_v=0} = \int_{Z_{i-1}}^{Z_i} \sin \left(M_m^i \frac{Z - Z_{i-1}}{Z_i - Z_{i-1}} \right) dZ -$$

$$\int_{Z_{i-1}}^{Z_i} \eta Z \sin \left(M_m^i \frac{Z - Z_{i-1}}{Z_i - Z_{i-1}} \right) dZ \quad (15)$$

其中:

$$\bar{u}_{Di}(m, T_v) = \int_{Z_{i-1}}^{Z_i} u_{Di}(Z, T_v) \sin\left(M_m^i \frac{Z - Z_{i-1}}{Z_i - Z_{i-1}}\right) dZ \quad (16)$$

$$\left. \begin{aligned} M_m^1 &= m\pi \\ M_m^2 &= (2m-1)\pi/2 \end{aligned} \right\} \quad (17)$$

式中: m 为有限 Fourier 正弦变换参数。

对式 (14) 作有限 Fourier 正弦逆变换, 得

$$u_{Di} = \sum_{m=1}^{\infty} \frac{2A_i \sin\left(M_m^i \frac{Z - Z_{i-1}}{Z_i - Z_{i-1}}\right)}{Z_i - Z_{i-1}} e^{-\left(\frac{M_m^i}{Z_i - Z_{i-1}}\right)^2 T_v} \quad (18)$$

其中:

$$A_i = \begin{cases} \frac{2[1 - (-1)^m + \eta Z_1 (-1)^m]}{m\pi}, i=1 \\ \frac{2(1-Z_1)}{(2m-1)\pi} \left[\frac{2\eta(1-Z_1)(-1)^{m-1}}{(2m-1)\pi} + (1-\eta Z_1) \right], i=2 \end{cases} \quad (19)$$

3.2.2 双面排水条件下地基超静孔压解答

与单面排水情况类似, 双面排水条件下任意位置点土体在任意时刻的超静孔压解答如下:

$$u_{Di} = \sum_{n=1}^{\infty} \frac{2B_i \sin\left(N_n \frac{Z - Z_{i-1}}{Z_i - Z_{i-1}}\right)}{Z_i - Z_{i-1}} e^{-\left(\frac{N_n}{Z_i - Z_{i-1}}\right)^2 T_v} \quad (20)$$

式中: $i=1, 2$; $N_n = n\pi$, n 为有限 Fourier 正弦变换参数。

$$B_i = \begin{cases} \frac{2[1 - (-1)^n + \eta Z_1 (-1)^n]}{n\pi}, i=1 \\ \frac{2[1 - (-1)^n - \eta Z_1 + \eta (-1)^n]}{n\pi}, i=2 \end{cases} \quad (21)$$

3.3 地基整体平均固结度解答

根据地基平均固结度的定义, T_v 时刻土层的平均固结度等于此时地基中土骨架已经承担的平均有效应力面积对最终平均有效应力面积的比值, 表示为

$$U = 1 - \frac{\sum_{i=1}^2 \int_{Z_{i-1}}^{Z_i} u_{Di} dZ}{\int_{Z_0}^{Z_2} (1-\eta Z) dZ} \quad (22)$$

将超静孔压解答式 (18)、(20) 代入式 (22)

可得单面排水条件下地基的平均固结度:

$$U = 1 - \frac{2}{2-\eta} \sum_{m=1}^{\infty} \frac{8Z_1 - 4\eta Z_1^2}{(2m-1)^2 \pi^2} e^{-\frac{(2m-1)^2 \pi^2}{Z_1^2} T_v} - \frac{2}{2-\eta} \sum_{m=1}^{\infty} \frac{8(1-Z_1)(1-\eta Z_1)}{(2m-1)^2 \pi^2} e^{-\frac{(2m-1)^2 \pi^2}{4(1-Z_1)^2} T_v} - \frac{2}{2-\eta} \sum_{m=1}^{\infty} \frac{16\eta(1-Z_1)^2 (-1)^m}{(2m-1)^3 \pi^3} e^{-\frac{(2m-1)^2 \pi^2}{4(1-Z_1)^2} T_v} \quad (23)$$

双面排水条件下地基的平均固结度:

$$U = 1 - \frac{2}{2-\eta} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{8Z_1 - 4Z_1^2 \eta}{(2n-1)^2 \pi^2} e^{-\frac{(2n-1)^2 \pi^2}{Z_1^2} T_v} - \frac{2}{2-\eta} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{8(1-Z_1)}{(2n-1)^2 \pi^2} e^{-\frac{(2n-1)^2 \pi^2}{(1-Z_1)^2} T_v} + \frac{2}{2-\eta} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{4\eta(1-Z_1)(Z_1+1)}{(2n-1)^2 \pi^2} e^{-\frac{(2n-1)^2 \pi^2}{(1-Z_1)^2} T_v} \quad (24)$$

3.4 解答的验证

在本文的推导中, 忽略了砂垫层的厚度以及竖直方向的渗流。文献[16]在进行参数分析时利用砂垫层完全透水条件下的有限元计算结果得出相关结论: 当砂垫层完全透水时, 砂垫层的厚度大小对于地基土超静孔压消散速率和固结速率的影响是很小的。由于文献[16]并未将计算结果无量纲化, 所以不便将本文解答与其作对比。为了进行误差分析, 图 3 将本文解答与文献[7] (考虑了砂垫层厚度) 解答作比较以评价前述假设的有效性, 初始孔压均匀分布时, 砂垫层设置于土层中部位置 (即 $h_1:h_2 = 1:1$), 文献[7]利用有限元方法求解得到的固结度 U 作为时间因子 T_v 的函数与本文提出的解答进行对比, 得到了较好的一致性。故在考虑水平排水砂垫

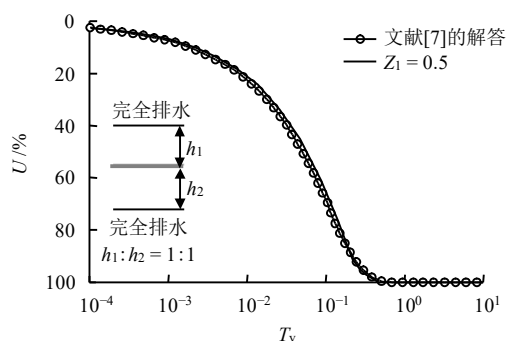


图 3 固结度本文解答与数值解的对比
Fig.3 Comparison of average consolidation degree calculated from the proposed solution and numerical solution

层铺设位置的优化问题时，认为忽略砂垫层的竖向渗流且其厚度与地基土厚度相比忽略不计的假设是合理的。

图 4 为本文解答与 Terzaghi^[20]一维固结理论的比较，单面排水条件下，初始孔压倒三角形分布时，当砂垫层无限接近于土体底面时，退化后的固结度曲线与双面排水条件下太沙基的固结度曲线完全重合，从理论上验证了本文相关假定的合理性以及含夹砂层地基固结解答的正确性。

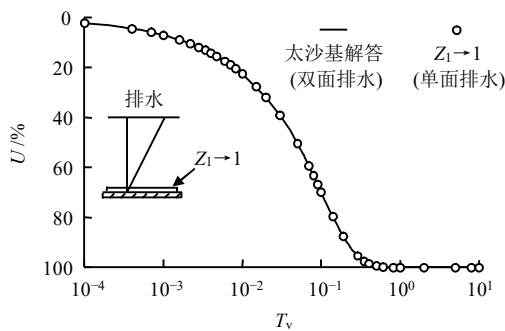


图 4 固结度本文解答的退化验证

Fig.4 Degradation of average consolidation degree calculated from the proposed solution

4 排水砂垫层的最优铺设深度分析

实际工程中，砂垫层沿地基深度方向是等间距布置的，但理论上分析砂垫层最优设置深度应该是随着时间不断发生变化的，所以本文结合相关规范^[17]：采用预压法处理的地基其固结度应达到 90% 以上。砂垫层最优铺设深度即是：在最短的时间使地基固结度达到 90% 所对应的砂垫层的铺设深度。故对式 (23)、(24) 求设置深度 Z_1 的偏导数，得

$$\frac{\partial U(Z_1, \eta, T_v)}{\partial Z_1} = 0 \quad (25)$$

再通过计算机编制相应的程序，可得到水平排水砂垫层的最优铺设深度随时间的变化曲线，砂垫层铺设深度与地基平均固结度的变化关系曲线。

4.1 初始超静孔压倒三角形、正三角形分布

初始超静孔压呈倒三角形 ($\eta=1$) 或正三角形 ($\eta \rightarrow \infty$) 分布时砂垫层的最优铺设深度随着时间变化关系图如图 5 所示。在固结前期，无论地基土何种排水条件、何种初始孔压分布，砂垫层放在地基土中初始超静孔压较大的部位更能加速超静孔压的消散；在固结后期，当时间因子 T_v 足够大时，无论地基土何种初始孔压分布，单面排水情况下，砂垫层的最深铺设深度位于土体深度 $2/3$ 位置，双面

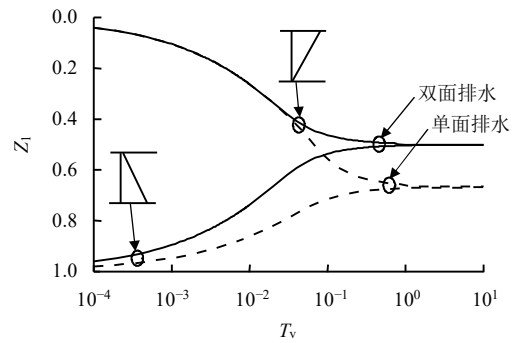


图 5 正、倒三角形初始孔压砂垫层最优铺设深度与时间的关系

Fig.5 Optimal installation depth of horizontal drainage channels versus time factor curve under the triangle and inverted triangle distribution of initial excess pore water pressure

排水条件下，砂垫层的最佳铺设深度位于土体深度 $1/2$ 位置。分析其原因：在固结前期，砂垫层设置在地基初始超静孔压较大部位可以更好加速地基土的整体固结；当时间因子很大时（如 $T_v > 1$ ）超静孔压在土层深度方上已基本消散并且近似呈均匀分布，从理论上分析，在单面排水条由式 (23) 对 Z_1 求导并令 $\eta = 0$ ，得

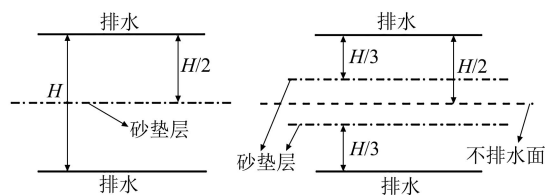
$$\frac{\partial U}{\partial Z_1} = \sum_{m=1}^{\infty} \left[\frac{-8}{(2m-1)^2 \pi^2} - \frac{16T_v}{Z_1^2} \right] e^{-\frac{(2m-1)^2 \pi^2}{Z_1^2} T_v} + \sum_{m=1}^{\infty} \left[\frac{8}{(2m-1)^2 \pi^2} + \frac{4T_v}{(1-Z_1)^2} \right] e^{-\frac{(2m-1)^2 \pi^2}{4(1-Z_1)^2} T_v} \quad (26)$$

令式 (26) = 0，解得 $Z_1 = 2/3$ ，即土层深度方向 $2/3$ 位置，在双面排水条件下，由式 (24) 对 Z_1 求导并令 $\eta = 0$ ，得

$$\frac{\partial U}{\partial Z_1} = \sum_{n=1}^{\infty} \left[\frac{8}{(2n-1)^2 \pi^2} + \frac{16T_v}{Z_1^2} \right] e^{-\frac{(2n-1)^2 \pi^2}{Z_1^2} T_v} - \sum_{n=1}^{\infty} \left[\frac{8}{(2n-1)^2 \pi^2} + \frac{16T_v}{(1-Z_1)^2} \right] e^{-\frac{(2n-1)^2 \pi^2}{(1-Z_1)^2} T_v} \quad (27)$$

令式 (27) = 0，解得 $Z_1 = 1/2$ ，即土层深度方向 $1/2$ 位置。图 6 为砂垫层的最优设置深度示意图，由图可知：在双面排水条件下，超静孔压对称分布，超静孔压的峰值面出现在中间位置，也称为不排水面，此时砂垫层应设置于此位置最有利于加速土体的固结，见图 6(a)；由于厚度为 H 的双面排水地基与厚度为 $0.5H$ 的单面排水条件地基固结速率等效，此时两个薄砂层将厚度为 H 的土层三等分，所以可

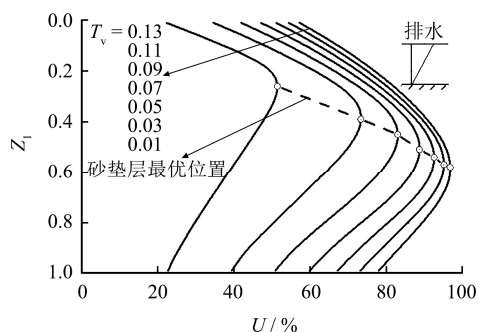
知单面排水条件下砂垫层应设置在土层深度方向 2/3 位置处, 见图 6(b)。



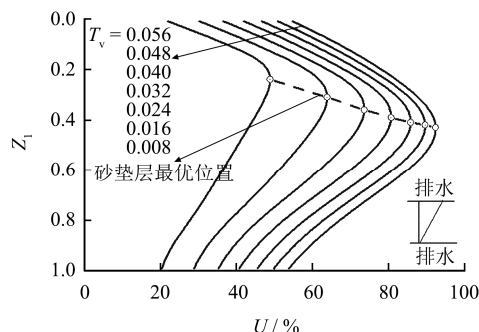
(a) 双面排水(土层厚度为 H) (b) 单面排水(土层厚度为 $0.5H$)

图 6 初始孔压均匀时砂垫层的最优设置深度示意图
Fig.6 Schematic diagram of the optimal laying position of sand blanket when the initial excess pore water pressure was uniform

以地基固结度达到 90% 为例优化砂垫层铺设深度。当初始孔压倒三角形分布时: 单面排水条件下, 如图 7(a) 所示, 当时间因子 T_v 在 0.01~0.13 变化时, 砂垫层的最佳铺设深度 Z_1 从 0.26 变化到 0.58, $Z_1 = 0.52$ 为砂垫层的最佳铺设深度; 双面排水条件下, 如图 7(b) 所示, 当时间因子 T_v 在 0.008~0.056 变化时, 砂垫层的最佳铺设深度 Z_1 从 0.24 变化到 0.43, $Z_1 = 0.42$ 为砂垫层的最佳铺设深度。当初始孔压正



(a) 单面排水

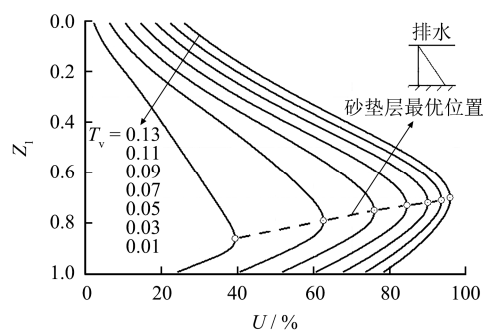


(b) 双面排水

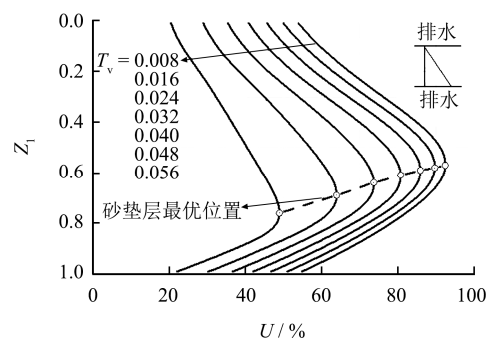
图 7 初始孔压倒三角形分布时不同时间因子下砂垫层设置深度与平均固结度的关系

Fig.7 Optimal installation depth of horizontal drainage channels versus average consolidation degree curve with different time factors under the inverted triangle distribution of initial excess pore water pressure

三角形分布时: 单面排水条件下, 如图 8(a) 所示, 当时间因子 T_v 在 0.01~0.13 变化时, 砂垫层的最佳铺设深度 Z_1 从 0.86 变化到 0.7, $Z_1 = 0.72$ 为砂垫层的最佳设置深度; 双面排水条件下, 如图 8(b) 所示, 当时间因子 T_v 在 0.008~0.056 变化时, 砂垫层的最佳铺设深度 Z_1 从 0.76 变化到 0.57, $Z_1 = 0.58$ 为砂垫层的最佳铺设深度。



(a) 单面排水



(b) 双面排水

图 8 初始孔压三角形分布时不同时间因子下砂垫层设置深度与平均固结度的关系

Fig.8 Optimal installation depth of horizontal drainage channels versus average consolidation degree curve with different time factors under the triangle distribution of initial excess pore water pressure

4.2 初始超静孔压倒梯形分布

当 $0 < \eta < 1$ 时, 初始孔压倒梯形分布。由图 9 可知, 当倒梯形的斜边斜率 η 取一定值时, 在固结前期, 无论地基土何种排水条件, 与上节所述的其他初始孔压分布形式类似, 砂垫层放在地基土中初始超静孔压较大的部位更能加速地基土的整体固结。当时间一定时, 随着倒梯形斜边斜率 η 增大, 砂垫层的最佳设置深度沿着土层向上移动, 这是由于 η 越大土层上半部分的初始超静孔压也就越大, 此时在该范围内的土层中设置砂垫层可以达到很好的固结效果。在固结后期, 当时间因子 T_v 足够大时, 单面排水条件下, 砂垫层的最佳铺设深度位于土体深度 2/3 位置; 双面排水条件下, 砂垫层的最深铺

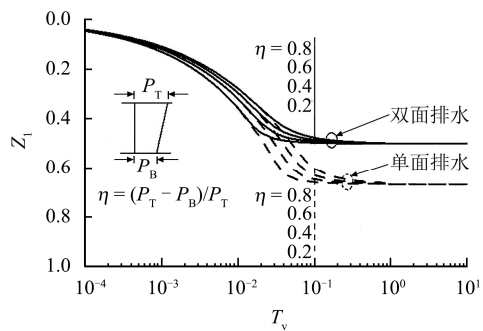


图 9 倒梯形初始孔压下砂垫层最优铺设深度与时间的关系

Fig.9 Optimal installation depth of horizontal drainage channels versus time factor curve under the inverted trapezoid distribution of initial excess pore water pressure

设深度位于土体深度 1/2 位置，理论分析同 4.1 节。以地基固结度达到 90% 为例优化砂垫层铺设厚度。单面排水条件下，如图 10(a) 所示，当 $\eta = 0.6$ ， T_v 在 0.01~0.13 变化时，砂垫层的最佳铺设深度 Z_1 从 0.3 变化到 0.6， $Z_1 = 0.62$ 为砂垫层的最佳铺设深度；双面排水条件下，如图 10(b) 所示，当 $\eta = 0.6$ ，

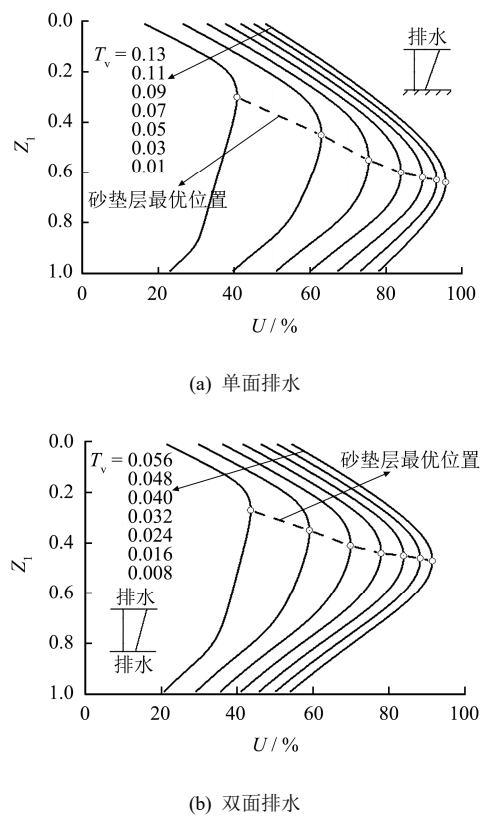


图 10 初始孔压倒梯形分布时不同时间因子下砂垫层设置深度与平均固结度的关系

Fig.10 Optimal installation depth of horizontal drainage channels versus average consolidation degree curve with different time factors under the inverted trapezoid distribution of initial excess pore water pressure

T_v 在 0.008~0.056 变化时，砂垫层的最佳铺设深度 Z_1 从 0.27 变化到 0.47， $Z_1 = 0.46$ 为砂垫层的最佳铺设深度。

5 算 例

某填海造陆工程，施工方式为堆载预压，地基排水条件为单面排水，砂垫层作为地基土内部的水平完全透水边界其厚度相对于地基土忽略不计，相应的土体参数如表 1 所示。

表 1 土工计算参数

Table 1 Calculation parameters of an engineering example			
土层厚度 /m	竖向固结系数 /(cm ² /s)	顶面附加应力 /kPa	底面附加应力 /kPa
15.0	1.7×10^{-3}	130.9	105.2

对于堆载预压排水固结法施工的地基，地基平均固结度需达到 90% 及以上，故以固结度达到 90% 为标准来优化设计砂垫层铺设深度。固结曲线如图 11 所示，从图中可以看出：铺设了砂垫层土体的平均固结度都高于未铺设砂垫层时土体平均固结度，在固结前期，采用常规设计的砂垫层 ($Z_1 = 0.5$) 和最优铺设深度 ($Z_1 = 0.66$) 的砂垫层地基固结速率相当，但在固结后期，砂垫层最优铺设深度对应的固结曲线明显左移，土体的固结速率大于砂垫层采用常规设计时土体的固结速率。在吹填土地基中采用砂垫层最优铺设深度与按常规设计铺设砂垫层、不设砂垫层的情况分别进行对比，当 T_v 取 0.09 时，采用优化设计的砂垫层铺设深度土体固结度提高幅度分别为 6% 和 54%。

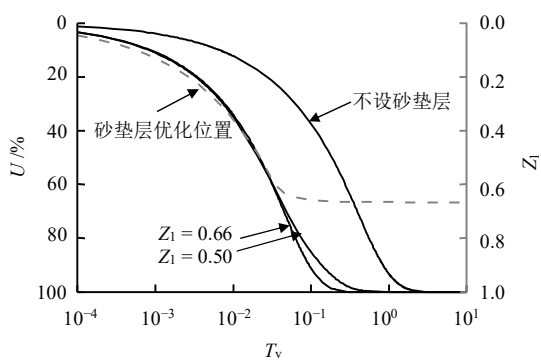


图 11 某实际工程砂垫层的不同设置深度地基固结度比较

Fig.11 Comparison of average consolidation degree of foundation in practical engineering with different setting positions of sand blankets

6 结 论

本文针对吹填土地基水平排水砂垫层铺设深

度优化问题,利用有限 Fourier 正弦变换法得到了初始孔压非均布下含砂垫层地基的解析解,采用数值方法对地基水平排水砂垫层的铺设深度进行了优化设计。主要得出以下结论:

(1) 初始孔压非均布时:在固结前期,砂垫层的最优铺设深度随着时间不断发生变化,砂垫层设置在土体超静孔压较大的部位能更好地加速地基土的整体固结;在固结后期,无论初始孔压何种分布,单面排水条件下,砂垫层的最佳铺设深度位于土体 $2/3$ (单面排水) 或 $1/2$ (双面排水) 深度位置。

(2) 在不同工况的初始超静孔压作用下,砂垫层的最优铺设深度 Z_1 ($0 < Z_1 < 1$) 是不同的。以地基平均固结度达到 90% 为例:单面排水时,当初始孔压呈倒三角形、正三角形、梯形分布时, $Z_1 = 0.52$ 、 0.72 、 0.62 ;双面排水时,当初始孔压呈倒三角形、正三角形、梯形分布时, $Z_1 = 0.42$ 、 0.58 、 0.46 。

(3) 通过算例分析可以表明:将在吹填土地基土中采用砂垫层最优铺设深度与按常规设计铺设砂垫层、不设砂垫层的情况分别进行对比, $T_v = 0.09$ 时,地基土平均固结度提高幅度分别为 6% 和 54%。

参考文献

- [1] CHAI J C, MIURA N. Investigation of factors affecting vertical drain behavior[J]. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 1999, 125(3): 216—226.
- [2] 许波, 雷国辉, 郑强, 等. 考虑涂抹区压缩及渗透系数变化的堆载预压固结解[J]. *岩土力学*, 2014, 35(6): 1607—1616.
XU Bo, LEI Guo-hui, ZHENG Qiang, et al. Solution of consolidation by surcharge preloading considering compressibility and varying hydraulic conductivities in smear zone[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2014, 35(6): 1607—1616.
- [3] 乐超, 徐超, 吴雪峰, 等. 两种塑料排水板滤膜淤堵特性试验研究[J]. *岩土力学*, 2014, 35(9): 2529—2534.
LE Chao, XU Chao, WU Xue-feng, et al. Experimental research on clogging characteristic of two types of PVD filters[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2014, 35(9): 2529—2534.
- [4] WEBER T M, PLOTZE M, LAUE J. Smear zone identification and soil properties around stone columns constructed in-flight in centrifuge model tests[J]. *Géotechnique*, 2010, 60(3): 197—206.
- [5] CAI Y Q, QIAO H H, WANG J, et al. Experimental tests on effect of deformed prefabricated vertical drains in dredged soil on consolidation via vacuum preloading[J]. *Engineering Geology*, 2017, 222: 10—19.
- [6] GIBSON R E, SHEFFORD G C. The efficiency of horizontal drainage layers for accelerating consolidation of clay embankments[J]. *Géotechnique*, 1968, 18(3): 327—335.
- [7] TAN S A, LIANG K M, YONG K Y, et al. Drainage efficiency of sand layer in layered clay-sand reclamation[J]. *Journal of Geotechnical Engineering*, 1992, 118(2): 209—228.
- [8] NOGAMI T, MAOXIN L. Consolidation of system of clay and thin sand layers[J]. *Soils and Foundations*, 2002, 42(4): 1—11.
- [9] NOGAMI T, MAOXIN L. Consolidation of clay with a system of vertical and horizontal drains[J]. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 2003, 129(9): 838—848.
- [10] CHAI J C, HORPIBULSUK S, SHEN S. Consolidation analysis of clayey deposits under vacuum pressure with horizontal drains[J]. *Geotextiles and Geomembranes*, 2014, 42(5): 437—444.
- [11] CHU J, GUO M. Land reclamation using clay slurry or in deep water: challenges and solutions[J]. *Japanese Geotechnical Society Special Publication*, 2016, 2(51): 1790—1793.
- [12] BERGADO D T, SINGH N, SIM S H, et al. Improvement of soft Bangkok clay using vertical geotextile band drains compared with granular piles[J]. *Geotextiles and Geomembranes*, 1990, 9(3): 203—231.
- [13] 刘小文, 许成承, 沈细中, 等. 排水措施对黄河堤防淤背体排水效果试验研究[J]. *岩土力学*, 2010, 31(11): 3563—3568.
LIU Xiao-wen, XU Cheng-cheng, SHEN Xi-zhong, et al. Experimental study of drainage effect for different drainage measures on Yellow River dike body reinforced by desilting[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2010, 31(11): 3563—3568.
- [14] SILLS G C. An assessment using three field studies of the theoretical concept of the efficiency of drainage layers in an embankment[J]. *Géotechnique*, 1974, 24(4): 467—474.