

DOI: 10.16285/j.rsm.2018.0912

考虑起始水力坡降的天然非均质地基固结分析

金丹丹, 王 素, 李传勋

(江苏大学 土木工程与力学学院, 江苏 镇江 212013)

摘 要: 实际工程中通常为未经处理的天然非均质地基。低水力坡降下黏性土中渗流存在起始水力坡降的现象也逐渐被认可, 但能考虑起始水力坡降的非均质地基固结模型鲜见报道。基于具有起始水力坡降的渗流模型, 考虑实际中的变荷载, 对压缩模量和渗透系数随深度变化的非均质地基固结问题展开研究。通过压缩模量随深度增加及渗透系数随深度减小考虑天然地基的非均质性, 进而建立了单层非均质地基一维固结模型。分析了起始水力坡降 i_0 , 非均质地基参数 α 、 x 、 μ 和 p 对非均质地基固结特性的影响。结果表明: 考虑起始水力坡降后非均质地基中孔压消散速率变慢, 地基沉降以及固结速率随之降低; 固结速率与参数 α 、 x 成正比, 而地基的最终沉降量与之成反比; 参数 μ 越大, p 越小, 固结速率越快, 但渗透系数仅改变地基的沉降速率, 不会影响非均质土层的最终沉降量。

关 键 词: 固结理论; 起始水力坡降; 天然非均质地基; 变荷载; 有限差分

中图分类号: TU 46+2

文献标识码: A

文章编号: 1000-7598 (2019) 04-1433-08

Analysis of consolidation of natural heterogeneous soils with a threshold hydraulic gradient

JIN Dan-dan, WANG Su, LI Chuan-xun

(Faculty of Civil Engineering and Mechanics, Jiangsu University, Zhenjiang, Jiangsu 212013, China)

Abstract: In practical engineering, the foundation is usually untreated, natural and heterogeneous. The phenomenon that threshold hydraulic gradient exists in clayey soil under low hydraulic gradient is gradually recognized. However, the consolidation model of heterogeneous foundations considering threshold hydraulic gradient is rarely reported. In this paper, based on seepage model considering threshold hydraulic gradient, the consolidation problem of heterogeneous foundation was studied, the change law of compressive modulus and permeability coefficient with depth under variable loads were obtained. One-dimensional consolidation model of single-layer heterogeneous foundation was established with an assumption that the compression modulus increases with depth, and the permeability coefficient decreases with depth. The influence of threshold hydraulic gradient i_0 , heterogeneous foundation parameter α , x , μ and p on the consolidation characteristics of heterogeneous foundation were analyzed. The results show that, the rate of pore pressure dissipation becomes slower in heterogeneous foundation after considering threshold hydraulic gradient and settlement as well as consolidation rate of the foundation decreases accordingly. The consolidation rate is directly proportional to the value of α and x while the final settlement of the foundation comes inversely proportional to them. The consolidation rate grows with the increase of μ and the decrease of p . However, the permeability coefficient may only change the settlement rate of foundation, which will not affect the final settlement of the heterogeneous foundations.

Keywords: consolidation theory; threshold hydraulic gradient; natural heterogeneous foundation; variable load; finite difference

1 引 言

天然黏性土均具有非均质特性, 非均质地基在实际工程中广泛存在。同时, 地基土的非均质性与土体变形和强度特性紧密相关。故研究非均质地基

固结理论具有重要的理论与实际意义。Gibson 等^[1]最先开展对瞬时荷载下非均质地基的一维固结研究, 其假定土中渗透系数 k_v 和体积压缩系数 m_v 随深度变化, 并获取其有限差分解。方晔等^[2]对半透水边界下非均质土一维固结问题进行了研究。江雯

收稿日期: 2018-05-24

基金项目: 国家自然科学基金项目(No. 51708256, No. 51878320); 江苏省自然科学基金(No. BK20150512)。

This work was supported by the National Natural Science Foundation of China (51708256, 51878320) and Natural Science Foundation of Jiangsu Province (BK20150512).

第一作者简介: 金丹丹, 女, 1987 年生, 博士, 讲师, 主要从事土动力学方面的研究工作。E-mail: jddnjut@163.com

等^[3]获取土体压缩模量随深度线性变化下的非均质土一维固结解析解,并讨论了非均质参数对固结性状的影响。夏建中等^[4]考虑了实际地基的成层性和变荷载,推导了土体渗透系数和压缩系数均随深度任意变化的成层非均质地基一维固结半解析解。潘旦光等^[5]利用分离变量法求解了任意荷载下渗透系数和体积压缩系数随深度呈幂函数变化地基的一维固结解析解。

上述研究表明,地基土的非均质性对固结性状的确存在很大影响。但需说明的是,以上研究中均假定土中渗流遵循传统的达西定律。事实上,诸多室内试验及现场实测表明,软黏土中渗流在低水力坡降下存在非达西渗流现象^[6-8]。诸多非达西渗流模型中最简单的是具有起始水力坡降的渗流模型。Pascal 等^[9]最先给出了考虑起始水力坡降渗流的软土一维固结解答。刘慈群^[10]基于起始水力坡降渗流模型,采用积分关系式给出了软土一维固结近似解。Xie 等^[11]将移动边界近似固定后得到起始水力坡降下软土一维固结近似解。刘忠玉等^[12]给出了考虑起始水力坡降的土体一维固结有限差分解。此外,考虑起始水力坡降的软土大应变固结理论也有文献报道^[13-15]。但以上考虑起始水力坡降固结理论均未考虑天然土体非均质性对固结性状的影响。

本文基于起始水力坡降渗流模型,考虑实际中的变荷载,对压缩模量和渗透系数均随深度变化的非均质地基展开研究。建立了考虑起始水力坡降影响的非均质地基一维固结模型并给出其有限差分解,在此基础上分析了起始水力坡降 i_0 及非均质性对超静孔隙水压力消散速率、渗流前锋移动情况及固结速率的影响。

2 固结计算模型的建立

2.1 问题的描述及基本假定

如图1所示,厚度为 H 的非均质地基顶面透水、底面不透水。土层顶面作用有单级荷载 $q(t)$,荷载初始值为 q_0 ,经时间 t_c 后达稳定值 q_u 。图1中, $\sigma'(z,t)$ 为土的有效应力, $u(z,t)$ 为土中的超静孔隙水压力。在外荷载 $q(t)$ 作用下,土中孔隙水逐渐排出,而土骨架承受的有效应力逐渐增加,从而逐渐完成土体的固结。

为建立起始水力坡降下非均质地基一维固结模型,做如下假定:①土体完全饱和;②土中水和固体颗粒均不可压缩;③天然土体沉积过程中土层压缩模量随深度增加。应用如下关系描述压缩模量随深度 z 的非线性变化:

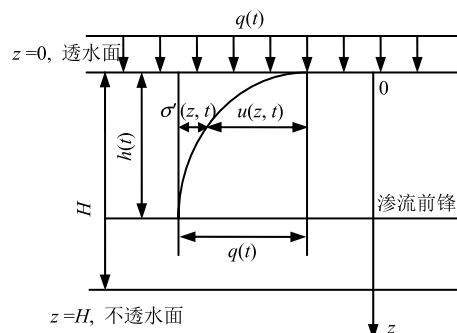


图1 考虑起始水力坡降的非均质地基
Fig.1 Heterogeneous foundation considering the threshold hydraulic gradient

$$E_s = E_{s0} (1 + \alpha z / H)^x \quad (1)$$

式中: E_s 为深度 z 处土的压缩模量,可通过室内压缩试验确定; E_{s0} 为土层顶面($z=0$)处的压缩模量,亦可利用室内压缩试验确定; H 为土层厚度; z 为竖向坐标; α 、 x 为参数,可通过拟合 E_s 与 E_{s0} 间线性或非线性关系而获得。当 $x=1$ 时,压缩模量随深度线性增加; $x=0$ 时,压缩模量随深度保持不变。

(4) 土中水只在竖直方向发生渗流,且遵循具有起始水力坡降的非达西渗流定律,表达为

$$v = \begin{cases} k_v i (1 - i_0 / |i|) & (|i| \geq i_0) \\ 0 & (|i| < i_0) \end{cases} \quad (2)$$

式中: v 为土中水的平均流速; i 为水力坡降; i_0 为起始水力坡降,可通过室内常水头渗透试验测定; k_v 为深度 z 处土体的竖向渗透系数,可通过取样后进行室内渗透试验确定。由于天然土体的非均质性,渗透系数 k_v 为深度 z 的函数^[5],可普遍表达为

$$k_v = k_{v0} (1 + \mu z / H)^p \quad (3)$$

式中: k_{v0} 为顶面($z=0$)处土体的竖向渗透系数; μ 、 p 为参数,可通过拟合 k_v 与 k_{v0} 间线性或非线性关系而获得。 $p=1$ 时,渗透系数随深度线性变化; $p=0$ 时,渗透系数随深度保持不变。

2.2 控制微分方程的建立

土体一维固结的连续条件可普遍表达为

$$\frac{1}{1+e_0} \frac{\partial e}{\partial t} = \frac{\partial v}{\partial z} \quad (4)$$

式中: e_0 为初始孔隙比; e 为孔隙比; t 为时间。

若不考虑土体流变特性的影响,其一维压缩本构关系可进一步表达为

$$\frac{1}{1+e_0} \frac{\partial e}{\partial t} = - \frac{1}{E_s} \frac{\partial \sigma'}{\partial t} \quad (5)$$

式中: σ' 为土的有效应力。

根据有效应力原理 $\sigma' = q(t) - u(z, t)$, 式 (5) 为

$$\frac{1}{1+e_0} \frac{\partial e}{\partial t} = \frac{1}{E_s} \left[\frac{\partial u(z, t)}{\partial t} - \frac{dq(t)}{dt} \right] \quad (6)$$

式中: $u(z, t)$ 为 z 处 t 时刻超静孔隙水压力。

将式 (6) 代入式 (4) 得

$$\frac{\partial v}{\partial z} = \frac{1}{E_s} \left[\frac{\partial u(z, t)}{\partial t} - \frac{dq(t)}{dt} \right] \quad (7)$$

固结中由于起始水力坡降 i_0 的存在, 使得下边界逐渐下移, 即存在着移动边界问题。Pascal 等^[9] 将此移动下边界称为渗流前锋, 如图 1 所示。记 t 时刻渗流前锋在坐标系中到达的位置为 $z=h(t)$ 。此时, $z \leq h(t)$ 区域内土中存在渗流, 而 $z > h(t)$ 区域内土中则无渗流发生。将式 (1)、(2) 代入式 (7) 得变荷载下非均质土体固结控制微分方程应用渗流前锋 $h(t)$ 表达为

$$\left. \begin{aligned} & C_{v0} (1 + \alpha z/H)^x \frac{\partial}{\partial z} \left[(1 + \mu z/H)^p \cdot \right. \\ & \left. \left(1 - \gamma_w i_0 \left/ \left| \frac{\partial u(z, t)}{\partial z} \right| \right) \frac{\partial u(z, t)}{\partial z} \right] = \\ & \left. \begin{aligned} & \frac{\partial u(z, t)}{\partial t} - \frac{dq(t)}{dt}, \quad z < h(t) \\ & u(z, t) = q(t), \quad z \geq h(t) \end{aligned} \right\} \quad (8) \end{aligned}$$

式中: C_{v0} 为土体顶面处固结系数, $C_{v0} = k_{v0} E_{s0} / \gamma_w$, γ_w 为水的重度。

2.3 定解条件

t 时刻, 坐标系中渗流前锋至 $z=h(t)$ 处, 渗流前锋处超静孔隙水压力 u 与水力坡降 i 满足的边界条件为

$$u(0, t) = 0 \quad (9)$$

$$u[h(t), t] = q(t) \quad (10)$$

$$\left. \frac{\partial u(z, t)}{\partial z} \right|_{z=h(t)} = \gamma_w i_0 \quad (11)$$

如果渗流前锋至土层底面, 即 $h(t)=H$, 此时移动边界改变为固定边界, 需满足的边界条件为

$$\left. \frac{\partial u(z, t)}{\partial z} \right|_{z=H} = \gamma_w i_0 \quad (12)$$

固结模型的初始条件为

$$u(z, 0) = q_0 \quad (13)$$

3 控制方程的数值求解

3.1 控制方程及求解条件无量纲化

为方便求解, 将有关参数进行无量纲化:

$$\left. \begin{aligned} & Z = z/H, T_v = C_{v0} t / H^2, U(Z, T_v) = u(z, t) / q_u, \\ & X = h(t) / H, Q = q(t) / q_u, I_0 = i_0 \gamma_w H / q_u \end{aligned} \right\} \quad (14)$$

应用以上无量纲变量, 控制方程可改写为

$$\left. \begin{aligned} & (1 + \alpha Z)^x \frac{\partial}{\partial Z} \left[(1 + \mu Z)^p \left(1 - I_0 \left/ \left| \frac{\partial U(Z, T_v)}{\partial Z} \right| \right) \frac{\partial U(Z, T_v)}{\partial Z} \right] = \\ & \left. \begin{aligned} & \frac{\partial U(Z, T_v)}{\partial T_v} - \frac{dQ(T_v)}{dT_v}, Z < X(T_v) \\ & U(Z, T_v) = Q(T_v), Z \geq X(T_v) \end{aligned} \right\} \quad (15) \end{aligned}$$

相应的定解条件采用无量纲变量表达为

$$U(0, T_v) = 0 \quad (16)$$

$$U(Z, 0) = Q(T_v) \quad (17)$$

$$U[X(T_v), T_v] = Q(T_v) \quad (18)$$

$$\left. \frac{\partial U(Z, T_v)}{\partial Z} \right|_{Z=X(T_v)} = I_0 \quad (19)$$

3.2 超静孔隙水压力的有限差分分解

首先将时间和土层进行离散, 主要步骤如下:

(1) 将土层划分为 N 等分, 每层厚度无量纲值 $\Delta Z = 1/N$, 则第 l 薄层的上下边界的坐标为 $Z_{l-1} = (l-1)\Delta Z$, $Z_l = l\Delta Z$, $l=1, 2, \dots, N$ 。

(2) 将时间 T_v 离散成许多个微小时间段, 把第 k 个时间间隔记作 ΔT_v^k , 而此时终止时间记作, $T_v^k = \sum_{j=1}^k \Delta T_v^j$ 。离散后第 l 薄层 T_v^k 时刻的超静孔隙水压力记作 U_l^k , 外荷载记作 Q^k 。

采用 Pascal 等^[9]对移动边界的处理方法。加载瞬时渗流将会在第 1 薄层发生, 第 1 时段结束时, 移动边界发展到第 2 薄层底部。以此类推, 如果 $T_v^{(k+1)}$ 时刻第 l 薄层水力坡降大于 i_0 , 说明第 l 薄层已发生渗流, 此时移动边界至第 l 薄层底部。 T_v^k 时刻移动边界条件应用离散点表达为

$$U_l^{k+1} = Q^{k+1} \quad (20)$$

$$3U_l^{k+1} - 4U_{l-1}^{k+1} + U_{l-2}^{k+1} = 2I_0 \Delta Z \quad (21)$$

利用非线性偏微分方程的隐式差分格式, 控制方程式 (15) 对应的差分方程为

$$\left. \begin{aligned} U_l^{k+1} - U_l^k - (Q^{k+1} - Q^k) &= \lambda_{k+1} (1 + \alpha Z_l)^x \\ \left[\beta_{l+1/2}^k (U_{l+1}^{k+1} - U_l^{k+1}) - \beta_{l-1/2}^k (U_l^{k+1} - U_{l-1}^{k+1}) \right], 0 \leq s < l \\ U_l^{k+1} &= Q^{k+1}, l \leq s \leq N \end{aligned} \right\} \quad (22)$$

其中:

$$\lambda_{k+1} = \Delta T_v^{(k+1)} / (\Delta Z)^2 \quad (23)$$

$$\left. \begin{aligned} \beta_{l+1/2}^k &= \left[1 - I_0 \left/ \left| \frac{U_{l+1}^k - U_l^k}{\Delta Z} \right| \right] \times \left(1 + \mu \frac{Z_{l+1} + Z_l}{2} \right)^p \\ \beta_{l-1/2}^k &= \left[1 - I_0 \left/ \left| \frac{U_l^k - U_{l-1}^k}{\Delta Z} \right| \right] \times \left(1 + \mu \frac{Z_l + Z_{l-1}}{2} \right)^p \end{aligned} \right\} \quad (24)$$

根据式 (22), 渗流前锋至第 2 薄层底所需时间为

$$T_2 = \frac{U_1^1 - Q^1}{(1 + \alpha Z_1)^p \left[\beta_{1+1/2}^1 (U_2^1 - U_1^1) - \beta_{1-1/2}^1 (U_1^1 - U_0^1) \right]} \Delta Z^2 \quad (25)$$

$$\frac{U_{l+1}^{k+1} - U_l^{k+1}}{\Delta Z} \geq I_0 \quad (26)$$

如果在 $T_v^{(k+1)}$ 时刻第 $l+1$ 层内水力坡降满足式 (26), 此时渗流前锋至第 $l+1$ 薄层。通过该方法可确定渗流前锋至第 $l+1$ 薄层所需时间 $T_{l+1} = \sum_{j=1}^{k+1} \Delta T_v^j$ 。如果不满足式 (26), 说明渗流前锋仍然停滞在第 l 层, 参与固结计算的层数保持 l 层不变。

当渗流发展到土层底面时, 底面边界条件应用离散点表达为

$$\frac{3U_N^k - 4U_{N-1}^k + U_{N-2}^k}{2\Delta Z} = I_0 \quad (27)$$

3.3 两种平均固结度的求解

非均质土层 T_v^k 时刻的沉降量 S_t 及最终沉降值 S_∞ 分别为

$$\begin{aligned} S_t &= \int_0^H \varepsilon_z dz = \int_0^H [q(t) - u(z, t)] / E_s dz = \\ &= \frac{q_u H}{E_{s0}} \frac{1}{N} \sum_{l=1}^N \frac{Q^k - \frac{U_{l-1}^k + U_l^k}{2}}{(1 + \alpha Z_l)^x} \end{aligned} \quad (28)$$

$$S_\infty = \int_0^H \varepsilon_{zf} dz = \int_0^H q_u / E_s dz = \frac{q_u H}{E_{s0}} \frac{1}{N} \sum_{l=1}^N \frac{1}{(1 + \alpha Z_l)^x} \quad (29)$$

按变形及超静孔隙水压力分别定义的土层平均固结度 U_{st} 及 U_{pt} 分别为

$$U_{st} = \frac{S_t}{S_\infty} = \frac{\sum_{l=1}^N \frac{Q^k - \frac{U_{l-1}^k + U_l^k}{2}}{(1 + \alpha Z_l)^x}}{\sum_{l=1}^N \frac{1}{(1 + \alpha Z_l)^x}} \quad (30)$$

$$U_{pt} = \begin{cases} Q(T_v) - \frac{1}{2N} \sum_{l=1}^N (U_{l-1}^k + U_l^k), T_v \leq T_{vc} \\ 1 - \frac{1}{2N} \sum_{j=1}^N (U_{l-1}^k + U_l^k), T_v > T_{vc} \end{cases} \quad (31)$$

4 差分解的验证

笔者前期工作^[16]已给出基于达西定律压缩模量和渗透系数均随深度变化的计算程序, 并且与已有文献对比后已经验证了其正确性。本文若令起始水力坡降 $i_0 = 10^{-5}$, 非达西渗流近似转化为达西渗流。单级加载时间 $T_{vc} = 0.05$, 其他计算参数如表 1 所示, 两者之间的对比分析结果如图 2 所示。从图中可以看出, 本文的数值计算结果与达西定律下计算结果基本完全吻合, 在保证超静孔隙水压力正确的前提下, 只要确保沉降和固结度计算公式在程序中的正确表达, 即可保证本文计算结果的可靠性。

表 1 达西定律下土体计算参数

Table 1 Calculation parameters of soil under Darcy's law

H /m	q_u /kPa	E_{s0} /MPa	γ_w /(kN/m ³)	k_v /(10 ⁻⁶ cm/s)	x	μ	p
10	200	6.78	10	3.2	1	0	0

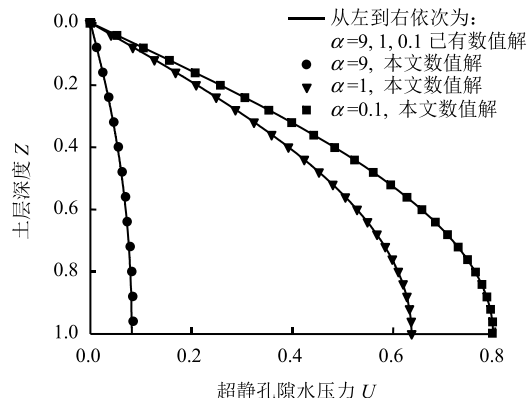


图 2 达西定律与非达西渗流间不同 α 值下孔压 U 的对比
Fig.2 Comparison of U between Darcy's law and non Darcian flow law under different values of α

5 固结性状分析

为进一步认识起始水力坡降及天然土非均质性对固结性状的影响, 外荷载采用单级加载, 加载时间 $T_{vc}=0.05$, 其余土性参数见表 2。

表 2 非均质土体的计算参数

Table 2 Calculation parameters of heterogeneous soil

H/m	q_u/kPa	$\gamma_w/(kN/m^3)$	E_{s0}/MPa	$k_{v0}/(10^{-6} cm/s)$
10	200	10	6.78	3.2

5.1 起始水力坡降 i_0 对非均质地基固结性状的影响

以下分析中, 非均质地基参数取值为 $\alpha=0.2$, $x=1$, $\mu=-0.1$, $p=1$ 。

图 3 为 $T_v=0.5$ 时超静孔隙水压力随深度变化曲线图。同一深度处超静孔隙水压力随起始水力坡降 i_0 增大而增大, 起始水力坡降 i_0 越大, 孔隙水压力消散越慢。同时, 起始水力坡降使土中水力坡降大于 i_0 后方发生渗流, 如图 4 所示, 渗流前锋向下发展的速度与 i_0 紧密相关。随着 i_0 的增大, 渗流前锋向下发展的速度越来越慢。起始水力坡降也使超静孔隙水压力不能完全消散。如图 5 所示, 当 $i_0=0.000\ 01$, 也就是土中渗流可以近似满足达西定律时, 土层按孔压定义的平均固结度能至 100%, 而当起始水力坡降取值分别为 $i_0=0.5, 1.0, 1.5$ 时, 土层按孔压定义的平均固结度随 i_0 增大明显减小, 且这种差异会随 i_0 增大越来越明显, 这也就解释了图 6 所示的地基沉降随着起始水力坡降 i_0 的增大逐渐变小的现象。

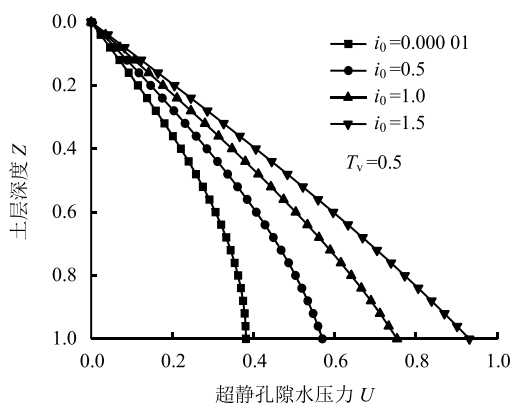


图 3 孔压随深度消散曲线图

Fig.3 The dissipation of excess pore water pressure with depth

5.2 参数 α 、 x 对固结性状的影响

以下对地基固结性状的分析中, 非均质地基参数取值为 $x=1$, $\mu=0$ (或 $p=0$), 即为压缩模量随深度线性变化, 渗透系数为常数的非均质地基。同时

考虑土体中存在起始水力坡降, 取值为 $i_0=0.5$ 。

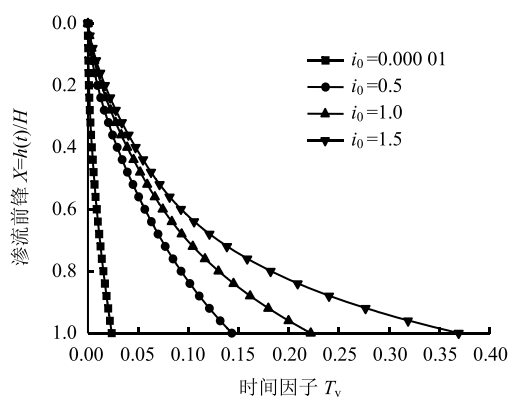


图 4 起始水力坡降 i_0 对渗流前锋的影响

Fig.4 Influence of threshold hydraulic gradient i_0 on flow front location

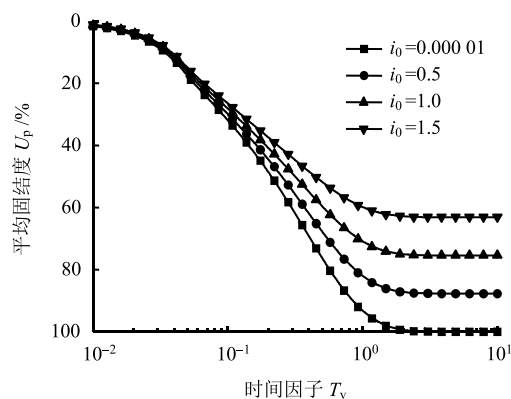


图 5 起始水力坡降 i_0 对应力定义平均固结度的影响

Fig.5 Influence of i_0 on average degree of consolidation in term of stress

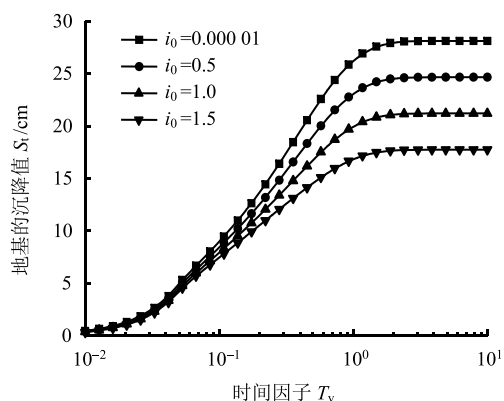


图 6 起始水力坡降 i_0 对地基沉降的影响

Fig.6 Influence of i_0 on the settlement of foundation

图 7 给出了参数 α 分别取值为 0.0 (均质地基)、0.1、1.0、9.0 时对渗流前锋的影响。从图中发现 α 取值为 0.1 时渗流前锋与时间因子之间的关系曲线与均质地基下的差距较小可忽略不计。但随着 α 的增大, 渗流前锋向下移动的速度越来越快, 与均质

土层相比差异也越大。同时,由图 8 可知, α 取值对固结速率也有较大影响, α 值越大,固结速率越快。但由于起始水力坡降的存在,非均质土固结度仍然不能达到 100%。

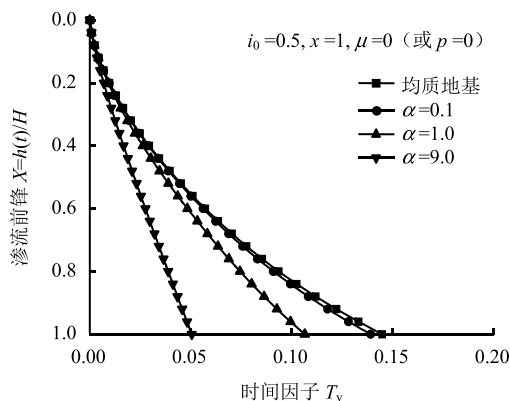


图 7 系数 α 对渗流前锋的影响
Fig.7 Influence of α on the flow front location

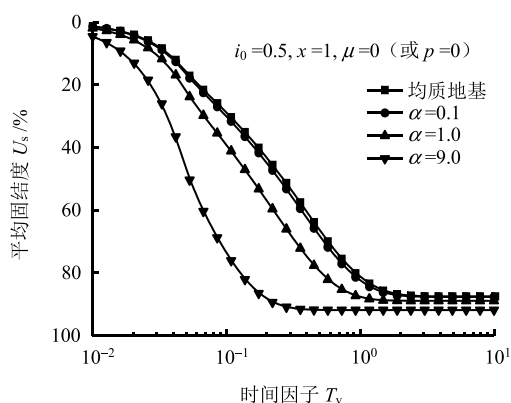


图 8 参数 α 对平均固结度的影响
Fig.8 Influence of α on average degree of consolidation

图 9 给出了参数 α 对地基沉降的影响, 可发现参数 α 取值为 9 时, 地基的沉降量很小; 相比之下均质地基的沉降量最大。随着 α 的增加, 均质地基与非均质地基及非均质地基之间的差距越来越大。其原因在于: α 越大, 土体压缩模量越大, 因此更不易被压缩, 沉降量自然越小。

可见地基土的非均质性在固结中不容忽视。实际中地基土压缩模量不仅随深度线性变化, 可能出现曲线增加的情况。图 10 为 x 取值分别为 0 (均质地基)、0.1、2.0、3.0 时, 非均质土体平均固结度 U_s 与时间关系曲线。可以发现土体固结速率随着 x 增大而加快, 且均快于均质土的固结速率。同时, 由图 11 可知, 均质地基的沉降量最大, 参数 x 取值越大, 地基的沉降量越小。原因在于, x 越大, 压缩模量越大, 故地基的最终沉降量越小。

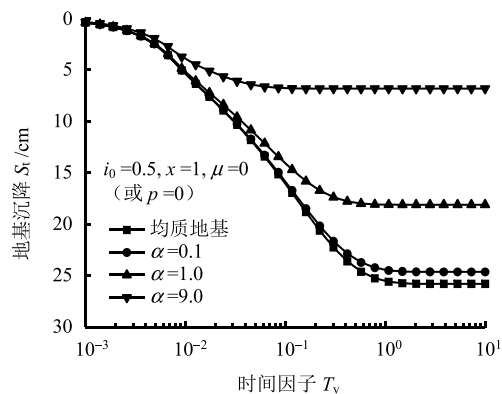


图 9 α 对地基沉降的影响
Fig.9 Influence of α on the settlement of foundation

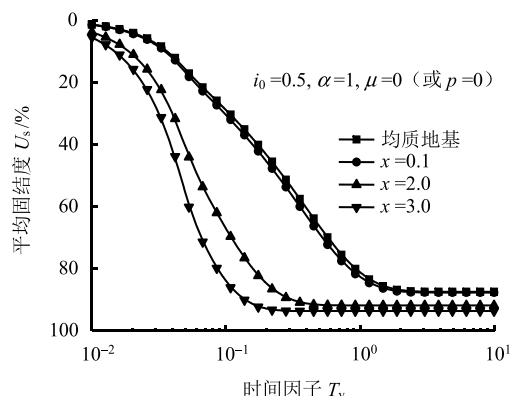


图 10 参数 x 对平均固结度的影响
Fig.10 Influence of x on average degree of consolidation

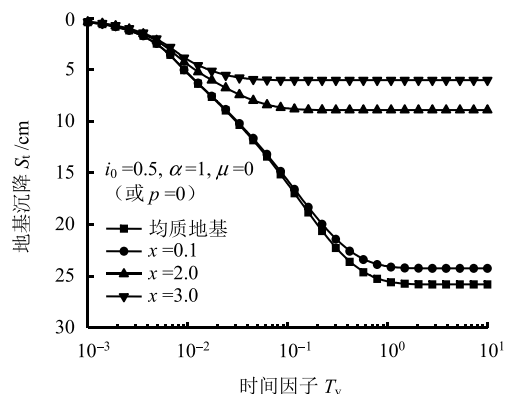


图 11 参数 x 对地基沉降的影响
Fig.11 Influence of x on the settlement

5.3 参数 μ 、 p 对固结性状的影响

渗透系数作为一个重要的土性参数, 在固结中起到举足轻重的作用, 因此对其进行分析显得尤为重要。本小节中压缩模量为常数, 参数 $p=1$, 主要探讨渗透系数随深度线性变化的非均质地基固结性状。从图 12 可知, 渗流前锋到达土层底部的速度随着 μ 的增大而加快, 均质地基渗流前锋移动速度最快。原因在于 μ 值的减小导致渗透系数逐渐减小, 渗流前锋的下移速度自然逐渐减慢。

图 13 为参数 μ 对地基沉降的影响曲线, 地基

的沉降速率随着 μ 的增加而加快, 需要注意的是, 参数 μ 的变化只是改变了非均质地基的沉降速率, 并没有对其最终沉降量造成影响。

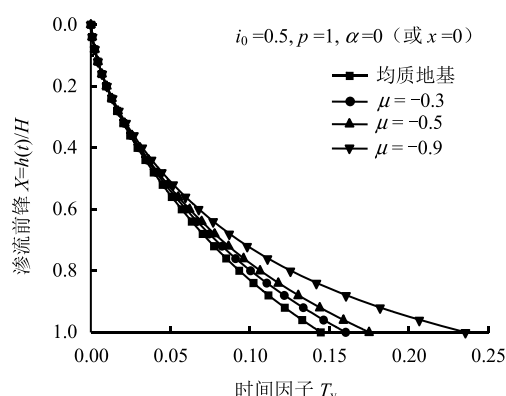


图12 参数 μ 对渗流前锋的影响
Fig.12 Influence of μ on flow front location

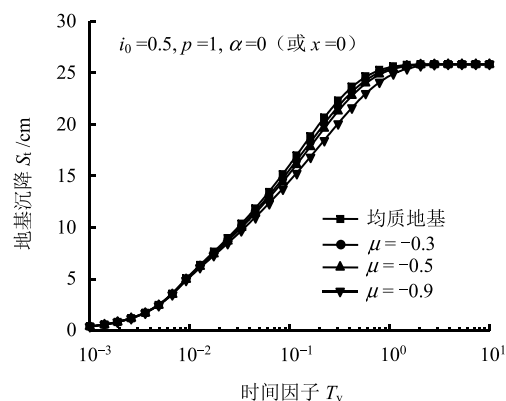


图13 渗透系数参数 μ 对地基沉降的影响曲线
Fig.13 Influence of the coefficient of permeability μ on foundation settlement

图14为 $T_v=0.5$ 时刻, 参数 p 不同值下超静孔隙水压力的消散曲线。从图中可发现, 在上层土体中, 均质地基与非均质地基的孔隙水压力残留值相差不大; 随着深度的增加, 均质地基与非均质地基之间的差距越来越大。参数 p 越大, 同一深度孔隙

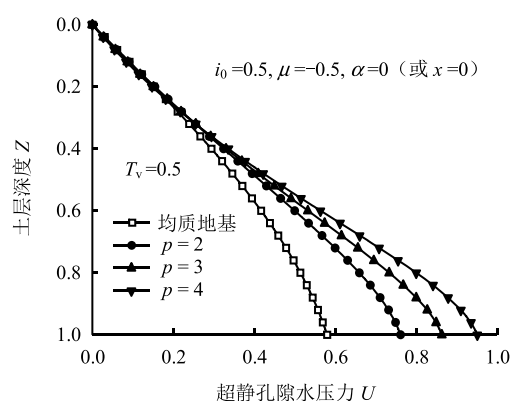


图14 超静孔隙压随深度消散曲线
Fig.14 The dissipation of excess pore pressure with depth

水压力残留值越大, 这说明孔隙水压力消散越慢, 非均质地基孔隙水压力消散速率小于均质地基假定下的超静孔隙水压力消散速率。超静孔隙水压力的消散速率对土体的固结沉降有着直接的影响, 如图15所示。随着渗透系数参数 p 的增大, 地基沉降速率减慢, 非均质地基的沉降速率均小于均质地基的沉降速率。但是参数 p 的取值同样并不改变非均质土的最终沉降量。

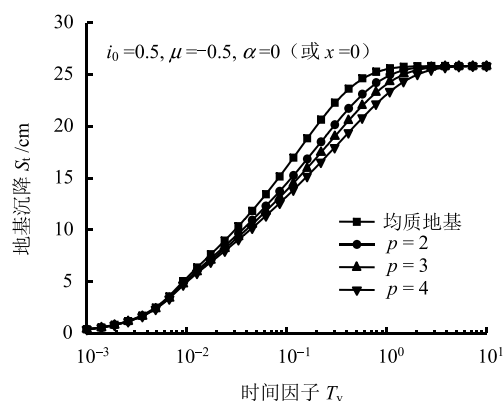


图15 参数 p 对地基沉降的影响
Fig.15 Influence of p on the foundation settlement

6 结 论

本文基于起始水力坡降渗流模型, 建立了土体中压缩模量和渗透系数均随深度变化的非均质地基固结模型, 并给出了考虑起始水力坡降的非均质地基一维固结控制方程, 分析了起始水力坡降 i_0 及非均质参数对土体固结性状的影响, 得出以下结论:

(1) 在压缩模量和渗透系数均随深度变化的非均质地基假定下, 起始水力坡降 i_0 越大, 孔隙水压力消散越慢, 渗流前锋下移速度越慢, 且非均质地基的固结速率也减慢, 按孔压定义的最终平均固结度也变小。

(2) 当考虑土中存在的起始水力坡降时, 压缩模量随深度变化参数 α 越大, 超静孔隙水压力消散速率越快, 固结速率越快, 地基的最终沉降量随 α 的变大而减小; 非均质地基的固结速率大于均质地基的固结速率, 当 $\alpha < 0.1$ 时, 非均质地基的固结性状与均质地基相比差异很小, 可忽略不计; 压缩模量随深度非线性变化时, 指数 x 越大, 固结速率越快, 非均质地基的沉降值越小。

(3) 当土体渗透系数随深度非线性变化时, 参数 μ 越大, p 越小, 超静孔隙水压力消散速率越快, 固结速率越快, 地基沉降速率越快, 非均质地基的沉降和固结速率小于均质地基下的固结速率。但是 μ 和 p 仅影响地基的沉降速率, 并不会对其最终沉

降量产生影响。

参考文献

- [1] GIBSON R E, SCHIFFMAN R L. Consolidation of non-homogeneous clay layers[J]. **Journal of Soil Mechanics and Foundations Division, ASCE**, 1964, 90(SM5): 1—30.
- [2] 方晔, 徐长节, 蔡袁强. Gibson 地基半透水边界一维固结分析[J]. 浙江大学学报(工学版), 2003, 37(6): 18—23.
FANG Ye, XU Chang-jie, CAI Yuan-qiang. One-dimensional consolidation analysis of saturated gibbon soils with semi-pervious boundaries[J]. **Journal of Zhejiang University (Engineering Science)**, 2003, 37(6): 18—23.
- [3] 江雯, 谢康和, 夏建中. 压缩模量随深度线性变化的软黏土地基一维固结解析解[J]. 科技通报, 2003, 19(6): 452—456, 460.
JIANG Wen, XIE Kang-he, XIA Jian-zhong. Analytical solution to 1D consolidation of soft clay with the modulus of compressibility varying linearly along depth[J]. **Bulletin of Science and Technology**, 2003, 19(6): 452—456, 460.
- [4] 夏建中, 江雯, 谢康和. 成层非均质地基一维固结方程半解析求解[J]. 中国公路学报, 2006, 19(3): 8—11.
XIA Jian-zhong, JIANG Wen, XIE Kang-he. Semi-analytical solution to one-dimensional consolidation equation of layered non-homogeneous subgrade[J]. **China Journal of Highway and Transport**, 2006, 19(3): 8—11.
- [5] 潘旦光, 吴顺川, 朱来磊. 土层性质幂函数变化下的一维固结[J]. 北京科技大学学报, 2008, 30(10): 1085—1089.
PAN Dan-guang, WU Shun-chuan, ZHU Lai-lei. One-dimension consolidation of soil layer with the soil properties as a power function of depth[J]. **Journal of University of Science and Technology Beijing**, 2008, 30(10): 1085—1089.
- [6] HANSBO S. Consolidation equation valid for both Darcian and non-Darcian flow[J]. **Geotechnique**, 2001, 51(1): 51—54.
- [7] HANSBO S. Deviation from Darcy's law observed in one-dimensional consolidation[J]. **Geotechnique**, 2003, 53(6): 601—605.
- [8] LOW P F, MILLER R J. Threshold gradient for water flow in clay systems[J]. **Soil Science Society of American Journal**, 1963, 27(6): 605—609.
- [9] PASCAL H, PASCAL F, MURRAY D W. Consolidation with threshold gradients[J]. **International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics**, 1981, 5(3): 247—261.
- [10] 刘慈群. 有起始比降固结问题的近似解[J]. 岩土工程学报, 1982, 4(3): 107—109.
LIU Ci-qun. Approximate solution of consolidation problem considering initial gradient[J]. **Chinese Journal of Geotechnical Engineering**, 1982, 4(3): 107—109.
- [11] XIE K H, WANG K, WANG Y L, et al. Analytical solution for one-dimensional consolidation of clayey soils with a threshold gradient[J]. **Computers and Geotechnics**, 2010, 37(4): 487—493.
- [12] 刘忠玉, 张天航, 马崇武. 起始水力梯度对饱和黏土一维固结的影响[J]. 岩土力学, 2007, 28(3): 467—470.
LIU Zhong-yu, ZHANG Tian-hang, MA Chong-wu. Effect of initial hydraulic gradient on one-dimensional consolidation of saturated clays[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2007, 28(3): 467—470.
- [13] 黄杰卿, 谢新宇, 王文军. 考虑起始比降的饱和土体一维复杂非线性固结研究[J]. 岩土工程学报, 2013, 35(2): 355—363.
HUANG Jie-qing, XIE Xin-yu, WANG Wen-jun, et al. Study on one-dimensional nonlinear consolidation behavior for saturated soils with threshold gradient[J]. **Chinese Journal of Geotechnical Engineering**, 2013, 35(2): 355—363.
- [14] 李传勋, 董兴泉, 金丹丹, 等. 考虑起始水力坡降的软土大变形非线性固结分析[J]. 岩土力学, 2017, 38(2): 377—384.
LI Chuan-xun, DONG Xing-quan, JIN Dan-dan, et al. Nonlinear large-strain consolidation analysis of soft clay considering threshold hydraulic gradient[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2017, 38(2): 377—384.
- [15] 李传勋, 董兴泉, 金丹丹, 等. 考虑起始坡降双层地基的大应变非线性固结[J]. 岩土力学, 2018, 39(5): 1877—1884.
LI Chuan-xun, DONG Xing-quan, JIN Dan-dan, et al. Large-strain nonlinear consolidation of double-layered soft clay with threshold gradient[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2018, 39(5): 1877—1884.
- [16] 王素, 李传勋, 金丹丹. 考虑非达西渗流的单层非均质地基固结分析[J]. 应用力学学报, 2018, 35(2): 285—291, 449—450.
WANG Su, LI Chuan-xun, JIN Dan-dan. Analysis on the consolidation of non-homogeneous soil with non-Darcian flow law[J]. **Chinese Journal of Applied Mechanics**, 2018, 35(2): 285—291, 449—450.