

# 基于非 Darcy 渗流的饱和黏土一维固结理论

刘忠玉<sup>1</sup>, 孙丽云<sup>2</sup>, 乐金朝<sup>2</sup>, 马崇武<sup>3</sup>

(1. 郑州大学 土木工程学院, 河南 郑州 450001; 2. 郑州大学 水利与环境学院, 河南 郑州 450001;

3. 东莞理工学院 建筑工程系, 广东 东莞 523808)

**摘要:** 按 Terzaghi 饱和黏土一维固结理论得到的固结度理论值有时与实际值之间存在较大的误差, 其原因之一是忽略了某些饱和黏土中孔隙水的渗流对 Darcy 定律的偏离。引入可以同时考虑低速渗流曲线段和较高速渗流直线段的非 Darcy 渗流方程, 重新推导饱和黏土一维固结方程, 并采用有限体积法对方程进行数值求解。与 Terzaghi 饱和黏土一维固结理论解析解的对比, 证明该方法的有效性。在此基础上, 探讨非 Darcy 渗流参数对固结过程的影响。计算结果表明, 非 Darcy 渗流延缓了饱和黏土中孔隙水压力的消散速度, 故使得地基的固结速度比 Terzaghi 一维固结理论值要慢。同时, 除固结系数外, 综合直线渗流起始水力梯度  $i_1$ 、土层厚度  $H$ 、地面荷载  $p_0$  等 3 个参数的指标  $I_1$  也是表征饱和黏土渗透固结特性的一个重要指标。最后, 讨论 Terzaghi 一维固结理论的适用范围。

**关键词:** 土力学; 固结理论; 饱和黏土; 有限体积法; 非 Darcy 渗流; 沉降; 固结度

**中图分类号:** TU 431

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1000 - 6915(2009)05 - 0973 - 07

## ONE-DIMENSIONAL CONSOLIDATION THEORY OF SATURATED CLAY BASED ON NON-DARCY FLOW

LIU Zhongyu<sup>1</sup>, SUN Liyun<sup>2</sup>, YUE Jinchao<sup>2</sup>, MA Chongwu<sup>3</sup>

(1. School of Civil Engineering, Zhengzhou University, Zhengzhou, Henan 450001, China; 2. School of Water Conservancy and Environment Engineering, Zhengzhou University, Zhengzhou, Henan 450001, China; 3. Department of Civil Engineering, Dongguan University of Technology, Dongguan, Guangdong 523808, China)

**Abstract:** There sometimes exists notable difference between the solution of one-dimensional consolidation of saturated clay layers based on Terzaghi's theory and the field settlement observations, which can be in a certain extent ascribed to that the flow of pore water in these soil layers may not obey Darcy's law. In order to improve the precision of consolidation computation, Terzaghi's one-dimensional consolidation theory is modified based on the non-Darcy flow described by the power function for the lower velocity of flow and the linear function for higher velocity of flow, and the numerical analysis is performed using the finite volume method. In order to verify its validity, the numerical solution by the present method for the case that the flow of pore water obeys Darcy's law is compared with the analytical solution based on Terzaghi's one-dimensional consolidation theory. Then the effects of the parameters of non-Darcy flow on the consolidation process are investigated. The numerical results indicate that the non-Darcy flow delays the dissipation of pore water pressure in saturated clay layers; thereby the consolidation velocity of these soil layers is smaller than the solution based on Terzaghi's theory. Besides the coefficient of consolidation, a new parameter  $I_1$  composed of the threshold hydraulic gradient  $i_1$ , the thickness of

**收稿日期:** 2008 - 10 - 25; **修回日期:** 2009 - 02 - 02

**基金项目:** 河南高速公路发展有限责任公司科技项目(2007GF009); 东莞市科技计划资助项目(2006 - 117)

**作者简介:** 刘忠玉(1968 -), 男, 博士, 1990年毕业于兰州大学力学系力学专业, 现任教授, 主要从事岩土力学等方面的教学与研究工作。E-mail: zhylieu@zzu.edu.cn

soil layer  $H$  and the vertical uniform load  $p_0$  is introduced to characterize the consolidation of these soil layers. Finally, the applicability of Terzaghi's one-dimensional consolidation theory is discussed.

**Key words:** soil mechanics; consolidation theory; saturated clay; finite volume method; non-Darcy flow; settlement; degree of consolidation

## 1 引言

Terzaghi 于 1923 年建立的饱和黏土一维固结理论至今仍在岩土工程中得到广泛的应用,但在实践中也发现其固结度理论值有时与实际值相差很大,特别是在小荷重情况下<sup>[1]</sup>。究其原因主要是 Terzaghi 采用了如下的基本假定,即土体符合线性应力-应变关系,土中渗流符合 Darcy 定律等。因此,众多学者分别从非线性应力-应变关系<sup>[2-6]</sup>、大变形<sup>[7]</sup>、层状地基<sup>[8]</sup>、渗流力<sup>[9]</sup>、土层的埋深<sup>[10]</sup>等多方面对该理论进行了修正。

在孔隙水渗流方面, Darcy 定律因其简洁而被广泛用于多种饱和土中。毋庸置疑,该定律可以描述饱和砂土以及多数孔隙较大的细颗粒土中处于层流状态的渗流,但其对渗透性较低的致密黏土以及某些软土的有效性却一直受到质疑。例如,王秀艳和刘长礼<sup>[11]</sup>对成因而于  $Q_4, Q_1, N_2$  时期的可塑至半胶结状黏土、粉质黏土,齐添等<sup>[12]</sup>对萧山黏土,以及 Y. E. Deng 等<sup>[13]</sup>对成都黏土的试验都发现了相关黏土中的渗流都不同程度地存在着对 Darcy 定律偏离的现象。王秀艳和刘长礼<sup>[11]</sup>将这种偏离归结为在不同水力梯度作用下饱和黏土中的重力水、毛细水、弱结合水共同综合作用的结果,并认为由于在渗透的不同阶段,这 3 种孔隙水参与运动的比例不同、所起作用不同,而其不同比重的自由水的释出规律控制着孔隙水渗流运动规律,这样就使得某些黏土的渗流曲线偏离了 Darcy 定律。

根据不同黏土的试验结果,非 Darcy 渗流的数学拟合形式也不尽相同<sup>[12-14]</sup>。其中, S. Hansbo<sup>[14]</sup>提出的关系式具有较广泛的适用性,即

$$q = \begin{cases} ci^m & (i \leq i_1) \\ q = K(i - i_0) & (i > i_1) \end{cases} \quad (1)$$

式中:  $q$  为渗流速度;  $m$  为由试验确定的常数;  $c$ ,  $K$  分别为指数形式表达式中的渗透系数和线性关系表达式中的渗透系数;  $i$  为水力梯度;  $i_1$  为直线渗流起始水力梯度;  $i_0$  为直线渗流计算起始水力梯度。 $i_0$ ,  $c$  满足如下关系式<sup>[15]</sup>:

$$\left. \begin{aligned} i_0 &= i_1 \frac{m-1}{m} \\ c &= \frac{K}{mi_1^{m-1}} \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

式(1)中: 如令  $m = 1$ , 则  $i_0 = 0$ ,  $c = K$ , 该式可退化为 Darcy 定律的表达形式; 如忽略低速渗流的非线性段或较高速渗流的直线段, 该式则可退化为刘忠玉等<sup>[16-18]</sup>或谢海澜等<sup>[15]</sup>在分析中所应用的非 Darcy 渗流形式。

很明显,此时如果仍用 Darcy 定律来描述这些黏土的渗流固结问题是不适宜的。因此,为了弄清这些黏土中渗流的非 Darcy 特性对其渗透固结的影响,刘忠玉等<sup>[16-18]</sup>忽略了式(1)中低速渗流的非线性段,采用仅考虑起始水力梯度的非 Darcy 渗流方程,修正了 Terzaghi 饱和黏土一维固结理论,探讨了起始水力梯度对黏土渗透固结的影响,在一定程度上解释了施建勇等<sup>[19]</sup>在用改造过的固结仪进行试验时发现的“在主固结完成时,土样中残余一定的孔隙水压没有完全消散”的现象;谢海澜等<sup>[15]</sup>则考虑了低速渗流的曲线段,对 Terzaghi 固结理论进行了重新推导,但其计算中没有考虑水力梯度  $i$  大于直线渗流起始水力梯度  $i_1$  的情况。本文用式(1)描述饱和黏性土固结过程中的渗流,即同时考虑低速渗流的曲线段和较高速渗流的直线段,并承认 Terzaghi 其他的假定条件,拟对 Terzaghi 一维固结理论进行修正,并探讨非 Darcy 渗流参数对饱和黏土一维固结的影响。

## 2 分析模型

### 2.1 方程的推导

分析和 Terzaghi 一维固结理论一样的土层,即设均质饱和黏土地基厚度为  $H$ , 顶面透水,底面不透水且不可压缩(见图 1)。假定:(1) 该饱和黏土层中的土粒和孔隙水不可压缩,且在自重作用下已经完成固结;(2) 土层顶面受到一次骤然施加的无限均布荷载  $p_0$  作用,这样,该土层中附加应力图形可取作矩形分布,且其中的渗流和土体变形只在竖向

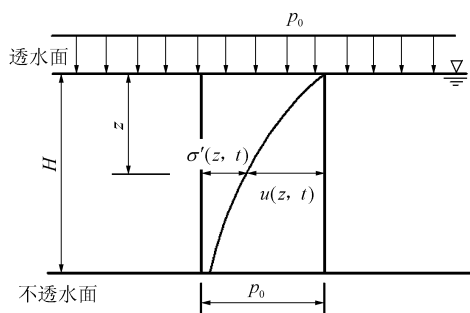


图 1 饱和黏土地基的固结过程

Fig.1 Process of consolidation in a saturated clay layer

发生; (3) 黏土层中的渗流可用式(1)描述; (4) 在固结过程中式(1)中的参数  $m$ ,  $i_1$  和  $K$ , 以及压缩系数  $a$  为常数。设时刻  $t$  时, 深度  $z$  处的孔隙水压力为  $u(z, t)$ , 采用和 Terzaghi 固结方程一样的推导过程, 可得非线性渗流一维固结方程为

$$\frac{C_v}{\gamma_w^{M-1} i_1^{M-1}} \left( \frac{\partial u}{\partial z} \right)^{M-1} \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} = \frac{\partial u}{\partial t} \quad (3)$$

式中:  $\gamma_w$  为孔隙水的重度;  $C_v$  为单向固结系数,  $C_v = \frac{K(1+e)}{a\gamma_w}$ ,  $e$  为孔隙比。当  $i \leq i_1$  时, 参数  $M = m$ , 当  $i > i_1$  时,  $M = 1$ 。很明显, 当  $m = 1$  时, 式(3)退化为 Terzaghi 一维固结方程。

式(3)的初始条件:

$$u(z, 0) = u_0 = p_0, \quad 0 \leq z \leq H \quad (4)$$

式(3)的边界条件:

$$u(0, t) = 0, \quad \frac{\partial u}{\partial z}(H, t) = 0, \quad t > 0 \quad (5)$$

为便于讨论, 将有关各量进行无量纲化, 即

$$\left. \begin{aligned} U &= \frac{u}{p_0}, \quad Z = \frac{z}{H}, \quad T = \frac{C_v t}{H^2} \\ I &= \frac{i \gamma_w H}{p_0}, \quad I_1 = \frac{i_1 \gamma_w H}{p_0} \end{aligned} \right\} \quad (6)$$

这样式(3)化为

$$\frac{1}{I_1^{M-1}} \left( \frac{\partial U}{\partial Z} \right)^{M-1} \frac{\partial^2 U}{\partial Z^2} = \frac{\partial U}{\partial T} \quad (7)$$

当  $I \leq I_1$  时,  $M = m$ ; 当  $I > I_1$  时,  $M = 1$ 。相应地初始条件式(4)和边界条件式(5)分别化为

$$U(Z, 0) = 1 \quad (0 \leq Z \leq 1) \quad (8)$$

$$U(0, T) = 0, \quad \frac{\partial U}{\partial Z}(1, T) = 0 \quad (T > 0) \quad (9)$$

## 2.2 有关参数的确定方法

基于非 Darcy 渗流进行上述固结分析时, 需首

先通过试验确定其有关参数。其中, 压缩系数  $a$  可按照常规固结试验确定, 而相关的非 Darcy 渗流参数则可借鉴齐添等<sup>[12]</sup>应用 GDS 先进固结系统进行的渗透固结试验来较好的确定, 即当在各级荷载作用下固结完成后, 在压力不变的条件下进行多组不同常水头渗透试验, 然后通过数据拟合即可。

## 3 方程的数值求解

上述微分方程由于是非线性的, 一般难以求得解析解, 可采用有限差分法、有限体积法或有限元法等求其数值解。其中有限体积法是在有限差分法的基础上发展起来的, 其出发点是积分形式的控制方程, 这一点不同于有限差分法; 同时积分方程表示了有关特征变量在控制容积内的守恒特性, 这一点又与有限元法不一样。另外, 离散方程中各项都具有明确的物理意义, 这是该法比有限差分法和有限元法更具优势的地方<sup>[20]</sup>。因此, 该法目前已广泛应用于流体流动和传热问题的数值计算中。刘忠玉等<sup>[16~18]</sup>曾先后用有限体积法和有限差分法对仅考虑起始水力梯度的非 Darcy 渗流模式下的固结方程进行过求解, 马崇武等<sup>[21]</sup>对比后认为 2 种数值方法都是适用的, 但有限体积法具有更好的收敛性。因此, 本文采用有限体积法来进行求解。

### 3.1 方程的离散

首先以  $\Delta Z$  将黏土层从上向下均分为  $N$  层, 每层为一控制容积, 并在每层的中点布置一个节点; 对时间按给定的步长  $\Delta T$  离散。然后在时间间隔  $\Delta T$  (时刻  $T_k \sim T_{k+1}$ ) 内, 在第  $j$  控制容积内对式(7)积分:

$$\int_{T_k}^{T_{k+1}} \int_{\Delta Z} \frac{1}{I_1^{M-1}} \left( \frac{\partial U}{\partial Z} \right)^{M-1} \frac{\partial^2 U}{\partial Z^2} dZ dT = \int_{T_k}^{T_{k+1}} \int_{\Delta Z} \frac{\partial U}{\partial T} dZ dT \quad (10)$$

式(10)可改写为

$$\int_{T_k}^{T_{k+1}} \left[ \frac{1}{MI_1^{M-1}} \left( \frac{\partial U}{\partial Z} \right)^M \Big|_X - \frac{1}{MI_1^{M-1}} \left( \frac{\partial U}{\partial Z} \right)^M \Big|_S \right] dT = \int_{\Delta Z} \left( \int_{T_k}^{T_{k+1}} \frac{\partial U}{\partial T} dT \right) dZ \quad (11)$$

式中: “X”, “S” 分别表示该控制容积的下、上边界。

对式(11)等式右边中  $U$  关于  $T$  的偏导数以一阶向前差分近似, 等式左边  $U$  关于  $Z$  的偏导数以中

间差分近似, 可得

$$\int_{T_k}^{T_{k+1}} \frac{1}{MI_1^{M-1}} \left[ \left( \frac{U_{j+1} - U_j}{\Delta Z} \right)^M - \left( \frac{U_j - U_{j-1}}{\Delta Z} \right)^M \right] dT = (U_{j, k+1} - U_{j, k}) \Delta Z \quad (12)$$

式中:  $U$  的下标中, 第一项表示空间节点, 第二项表示时间离散点, 下同。

要计算式(12)左边的时间积分项, 需要给出节点孔隙水压  $U_{j+1}$ ,  $U_j$  和  $U_{j-1}$  随时间的变化关系, 而这一关系是不知道的。通常的做法是利用  $T_k$ ,  $T_{k+1}$  时刻的孔隙水压力加权组合构成这一时间间隔内的平均值然后积分计算<sup>[20]</sup>。本文取  $T_k$ ,  $T_{k+1}$  时刻的权重分别为 0 和 1, 即按全隐格式计算。这样式(12)变为

$$\frac{1}{MI_1^{M-1}} \left[ \left( \frac{U_{j+1, k+1} - U_{j, k+1}}{\Delta Z} \right)^M - \left( \frac{U_{j, k+1} - U_{j-1, k+1}}{\Delta Z} \right)^M \right] \Delta T = (U_{j, k+1} - U_{j, k}) \Delta Z \quad (13)$$

即

$$U_{j, k+1} = U_{j, k} + \frac{1}{MI_1^{M-1}} \frac{\Delta T}{\Delta Z^{M+1}} [(U_{j+1, k+1} - U_{j, k+1})^M - (U_{j, k+1} - U_{j-1, k+1})^M] \quad (14)$$

### 3.2 初始条件和边界条件的处理

离散后的初始条件为

$$U_{j, 0} = 1 \quad (15)$$

对于控制容积 1, 考虑到透水边界条件(式(9)中的第一式), 其上边界处的孔隙水压梯度可近似为

$$\left. \frac{\partial U}{\partial Z} \right|_s = \frac{U_{1, k+1}}{\Delta Z / 2} \quad (16)$$

这样式(11)最后的离散形式为

$$U_{1, k+1} = U_{1, k} + \frac{1}{MI_1^{M-1}} \frac{\Delta T}{\Delta Z^{M+1}} [(U_{2, k+1} - U_{1, k+1})^M - 2^M U_{1, k+1}^M] \quad (17)$$

对于控制容积  $N$ , 考虑到不透水边界条件, 即式(9)中的第二式, 式(11)可变为

$$U_{N, k+1} = U_{N, k} - \frac{1}{MI_1^{M-1}} \frac{\Delta T}{\Delta Z^{M+1}} (U_{N, k+1} - U_{N-1, k+1})^M \quad (18)$$

由此可见, 式(14), (17)和(18)构成了封闭方程组, 可联合求解。考虑到相应的方程组在  $m > 1$  时为非线性的, 本文采用迭代法计算。

## 4 解法的收敛性和精度验证

尽管李人宪<sup>[20]</sup>已证明, 对于线性方程, 全隐格式对任意时间步长都是无条件稳定和收敛的, 但是由于本文的方程为非线性的, 其在迭代过程中的收敛性却并非如此。计算发现, 当  $\Delta Z$  给定时, 对于较大的时间步长  $\Delta T$ , 本文的迭代求解有时是不收敛的, 并且  $I_1$  越小(但不等于 0)或  $m$  越大时, 迭代收敛所需要的  $\Delta T$  越小。经试算, 当  $m = 1 \sim 3$  时, 如果式(14), (17)和(18)等号右边第二项的系数  $\frac{1}{MI_1^{M-1}} \frac{\Delta T}{\Delta Z^{M+1}} < 0.1$ , 本文的迭代求解都是收敛的, 所以为保证迭代收敛, 选用  $\Delta T$  时, 一般至少要比  $\Delta Z$  低 2~3 个数量级。另外, 为了保证足够的计算精度,  $\Delta T$  也需要取得足够小, 因此, 本文取  $\Delta T = 10^{-5} \sim 10^{-7}$ 。

很明显, 当  $m = 1$  时, 式(3)退化为 Terzaghi 一维固结方程。为考察控制容积数  $N$  对计算结果精度的影响, 本文分别取  $N = 10, 30, 50, 100$  首先用本文方法计算了  $m = 1$  时的固结度, 如表 1 所示。很明显, 数值解与 Terzaghi 一维固结方程的解析解在  $T$  较小时, 误差较大; 而  $T$  越大, 误差越小, 并且随着控制容积数  $N$  的增大, 误差越来越小。这是因为, 在  $T$  较小时, 固结度的解析值较小, 数值解存在的微小误差就会显得较大; 增大  $N$ , 就等于增加了节点数, 精度提高是必然的。特别地, 当  $N = 50$  时, 最大误差不超过 3%, 故以下计算中取  $N = 50$ 。

表 1  $m = 1$  时固结度数值解与解析解的比较

Table 1 Degree of consolidation of analytical solution compared to that of numerical solution ( $m = 1$ )

$T$	固结度数值解/%				固结度解析解/%	固结度数值解与解析解的误差/%			
	$N=10$	$N=30$	$N=50$	$N=100$		$N=10$	$N=30$	$N=50$	$N=100$
0.001	1.82	3.27	3.47	3.54	3.57	49.1	8.3	2.7	0.8
0.010	10.47	11.20	11.25	11.28	11.28	7.2	0.7	0.3	0.1
0.100	35.46	35.66	35.67	35.68	35.68	0.6	0.1	0.0	0.0
0.200	50.25	50.39	50.40	50.41	50.41	0.3	0.0	0.0	0.0
1.000	93.08	93.12	93.12	93.13	93.13	0.1	0.0	0.0	0.0

### 5 计算与分析

#### 5.1 非 Darcy 渗流参数对孔隙水压力消散的影响

首先考察  $m$  的影响。图 2(a), (b) 分别给出了  $I_1 = 1.0$  且时刻  $T = 0.050$  和  $1.000$  时孔隙水压力随深度的变化曲线和  $I_1 = 1.0$  且深度  $Z = 0.3$  和  $0.9$  处的孔隙水压力随时间的变化曲线(为便于分析, 图中以实线方式绘出了渗流符合 Darcy 定律时 Terzaghi 一维固结理论的计算值;  $U$  为孔隙水压力,  $Z$  为深度,  $T$  为时间, 均为量纲一的量, 下同)。很明显, 非 Darcy 渗流时的孔隙水压力都要比 Darcy 渗流时的大, 并且  $m$  值越大, 这种趋势越明显。这说明非 Darcy 渗流时孔隙水压力的消散速度要慢于 Darcy 渗流。另外, 从图 2(a) 中  $T = 0.050$  的曲线和图 2(b) 中  $Z = 0.3$  的曲线的前半段( $T < 0.100$ )可以看出, 几条曲线几乎重合。这说明在固结的初期,  $m$  值对离排水面较远处孔隙水压力的消散速度影响相对较小。

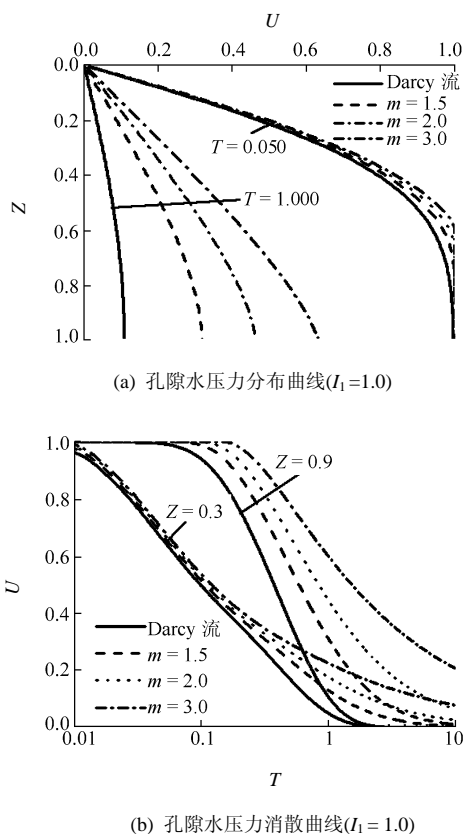


图 2  $m$  对孔隙水压力消散过程的影响

Fig.2 Influence of  $m$  on dissipation of pore water pressure

为考察  $I_1$  值的影响, 图 3(a), (b) 分别给出了  $m = 1.8$  且时刻  $T = 0.050$  和  $1.000$  时孔隙水压力随深度的变化曲线和  $m = 1.8$  且深度  $Z = 0.3$  和  $0.9$  处的

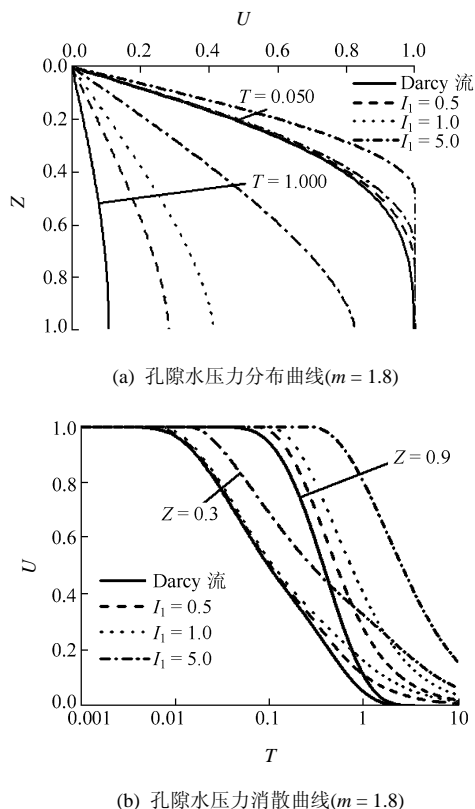


图 3  $I_1$  对孔隙水压力消散过程的影响

Fig.3 Influence of  $I_1$  on dissipation of pore water pressure

孔隙水压力随时间的变化曲线。很明显,  $I_1$  值对孔隙水压力消散的影响和  $m$  值相似, 即  $I_1$  值越大, 非 Darcy 渗流时的孔隙水压力就越比 Darcy 渗流时的大, 相应地, 非 Darcy 渗流时孔隙水压力的消散速度就越慢。

从图 2, 3 可以看出, 在固结的后期, 非 Darcy 渗流时的孔隙水压力消散远比 Darcy 渗流缓慢。如果按 Terzaghi 一维固结理论确定主固结的完成时间, 则会发现主固结完成后, 土体内仍然残留有一定的孔隙水压力没有完全消散。这正是施建勇等<sup>[19]</sup>在固结试验中发现的现象。刘忠玉等<sup>[16-18]</sup>也曾利用按忽略低速渗流非线性段的渗流模式修正的 Terzaghi 一维固结理论解释过这种现象, 并将其归结为渗流起始水力梯度的影响。实际上, 这部分残留的孔隙水压力也是可以消散的, 仅仅是消散速度很慢而已。因此, 低速段的非线性渗流在饱和黏土渗透固结中的作用是不可忽视的。

#### 5.2 非 Darcy 渗流参数对固结度的影响

计算出任意时刻的孔隙水压力后, 就可计算出平均固结度  $U_t$ 。尽管式(1)所示的渗流是非线性的, 但讨论的问题仍属匀质且线性变形的一维课题, 所以平均固结度  $U_t$  是按有效应力定义还是按变形定

义没有区别。为方便起见，下面分析中，计算的是按有效应力定义的平均固结度  $U_t$ 。

图 4, 5 分别给出了  $I_1 = 1.0$  但不同  $m$  值以及  $m = 1.8$  但不同  $I_1$  值的平均固结度  $U_t$  随时间的变化规律, 从图中可以看出, 非 Darcy 渗流减缓了黏土层的固结过程, 并且非 Darcy 渗流参数  $m$  或  $I_1$  越大, 减缓的程度就越大, 即达到同一固结度所需要的时间就越长。例如, 要使固结度  $U_t = 85\%$ , 按 Terzaghi 一维固结理论(即按 Darcy 渗流)算得所需要的时间为  $T = 0.684$ ; 如考虑非 Darcy 渗流, 当  $m = 1.8$  且  $I_1$  分别取 0.1, 0.5, 1.0 和 5.0 时, 算得所需要的时间分别为 0.737, 1.105, 1.753 和 6.232, 即分别是 Terzaghi 一维固结理论计算值的 1.08, 1.62, 2.56 和 9.11 倍。因此, 根据式(6)中  $I_1$  的定义可以得到下列推论: 土层厚度  $H$  越大或地面荷载  $p_0$  越小时, 黏性土层的固结速率就越慢, 即越偏离 Terzaghi 一维固结理论值。这正好可以解释黄文熙<sup>[1]</sup>指出的“实测固结速率与传统太沙基一维固结理论相比, 在大荷重下比较接近, 而小荷重下则相差较大”的现象。所以, 综合了直线渗流起始水力梯度  $i_1$ 、土层厚度  $H$ 、地面荷载  $p_0$  的指标  $I_1$  也是表征饱和黏土渗透固结的一个重要指标。

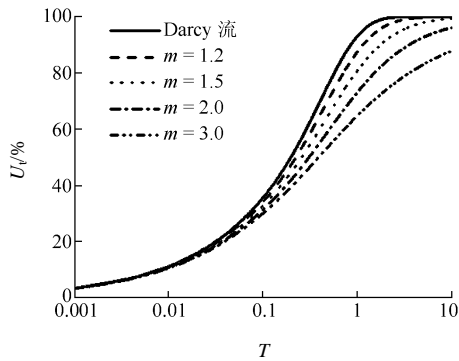


图 4  $m$  对平均固结度  $U_t$  的影响( $I_1 = 1.0$ )

Fig.4 Influence of  $m$  on degree of average consolidation( $I_1 = 1.0$ )

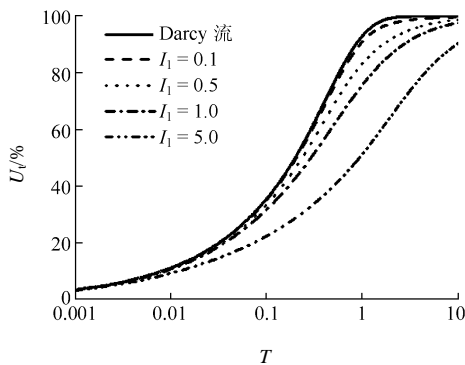


图 5  $I_1$  对平均固结度  $U_t$  的影响( $m = 1.8$ )

Fig.5 Influence of  $I_1$  on degree of average consolidation( $m = 1.8$ )

### 5.3 Terzaghi 一维固结理论的适用范围

从图 2~5 可以看出,  $m$  或  $I_1$  越小, 非 Darcy 渗流时的孔隙水压力和平均固结度就都越靠近 Terzaghi 一维固结理论的计算值。因此, 当  $m$  或  $I_1$  足够小时, 采用相对简单的 Terzaghi 一维固结理论是完全可以满足工程要求的。图 6 给出了当  $I_1 = 0.15$  且  $m = 1.0 \sim 3.0$  时平均固结度与 Terzaghi 一维固结理论值的偏离程度  $e_t$ , 可以看出,  $e_t$  的最大值出现在  $T = 1 \sim 3$  之间, 且  $m$  越大,  $e_t$  就越大, 但最大偏差不超过 5%。因此, 当  $m = 1.0 \sim 3.0$  时, 如果  $I_1 < 0.15$ , 则 Terzaghi 一维固结理论是适用的; 否则, 宜考虑非 Darcy 渗流的影响。

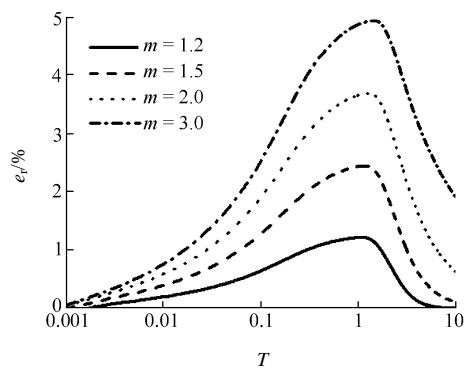


图 6 考虑非 Darcy 渗流时的平均固结度与 Terzaghi 一维固结理论值的偏离程度

Fig.6 Departure degree of average consolidation considering non-Darcy flow and that based on Terzaghi's theory

## 6 结 论

(1) 以同时考虑低速渗流曲线段和较高速渗流直线段的非 Darcy 渗流方程代替 Darcy 定律, 修正了 Terzaghi 饱和黏土一维固结方程。用有限体积法的数值分析表明, 非 Darcy 渗流延缓了饱和黏土中孔隙水压力的消散速度, 因此, 地基的固结速度要比 Terzaghi 固结理论值慢。计算表明, 参数  $m$  和  $I_1$  越大, 孔隙水压力的消散速度和地基的固结速度就都越慢。因此, 除固结系数外, 这 2 个参数也是表述饱和黏土固结特性的重要指标。

(2) 计算表明, 参数  $m$  或  $I_1$  越小, 地基的固结过程就越接近 Terzaghi 固结理论值。从  $I_1$  的定义可以看出, 直线渗流起始水力梯度  $I_1$  越小, 黏土层厚度  $H$  越小, 或上覆压力  $p_0$  越大, 考虑非 Darcy 渗流时地基的平均固结度与 Terzaghi 固结理论值的偏离程度越小。特别地, 当  $m = 1.0 \sim 3.0$  时, 如  $I_1 < 0.15$ , 则二者之间的最大偏离不超过 5%。

## 参考文献(References):

- [1] 黄文熙. 土的工程性质[M]. 北京: 水利电力出版社, 1983. (HUANG Wenxi. Engineering properties of soil[M]. Beijing: Water Resources and Electric Power Press, 1983.(in Chinese))
- [2] DAVIS E H, RAYMAND G P. A non-linear theory of consolidation[J]. *Geotechnique*, 1965, 15(2): 161 - 173.
- [3] MERSI G, ROKHSAR A. Theory of consolidation of clays[J]. *Journal of Geotechnical Engineering*, ASCE, 1974, 100(8): 889 - 903.
- [4] 施建勇, 杨立昂, 赵维炳. 考虑土体非线性特性的一维固结理论研究[J]. 河海大学学报, 2001, 29(1): 1 - 5.(SHI Jianyong, YANG Liang, ZHAO Weibing. Research of one-dimensional consolidation theory considering nonlinear characteristics of soil[J]. *Journal of Hohai University*, 2001, 29(1): 1 - 5.(in Chinese))
- [5] GIBSON R E, SCHIFFMAN R L, CARGILL K W. Theory of one-dimensional consolidation of saturated clays: II finite non-linear consolidation of thick homogeneous layers[J]. *Canadian Geotechnical Journal*, 1981, 19(2): 280 - 293.
- [6] 张磊, 孙树林. 变荷载下双曲线模型修正土体一维固结理论[J]. 岩石力学与工程学报, 2007, 26(增 2): 4 301 - 4 310.(ZHANG Lei, SUN Shulin. One-dimensional consolidation theory based on hyperbola model under time-dependent loading for saturated soil[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2007, 26(Supp.2): 4 301 - 4 310.(in Chinese))
- [7] 谢新宇, 朱向荣, 谢康和, 等. 饱和土体一维大变形固结理论新进展[J]. 岩土工程学报, 1997, 19(4): 30 - 38.(XIE Xinyu, ZHU Xiangrong, XIE Kanghe, et al. New developments of one-dimensional large strain consolidation theories[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 1997, 19(4): 30 - 38.(in Chinese))
- [8] 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 Kanghe. Theory of one-dimensional consolidation of double-layered ground and its applications[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 1994, 16(5): 24 - 35.(in Chinese))
- [9] 吴雄志. 考虑渗流力时对太沙基一维固结理论的修正[J]. 岩土力学, 2004, 25(8): 1 279 - 1 282.(WU Xiongzi. Modification of Terzaghi's one-dimensional consolidation theory by considering seepage force[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2004, 25(8): 1 279 - 1 282.(in Chinese))
- [10] 马崇武, 刘忠玉. 考虑饱和黏土埋深影响的一维非线性固结[J]. 岩石力学与工程学报, 2007, 26(增 2): 4 372 - 4 376.(MA Chongwu, LIU Zhongyu. One-dimensional nonlinear consolidation considering buried depth of saturated clay layer[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2007, 26(Supp.2): 4 372 - 4 376.(in Chinese))
- [11] 王秀艳, 刘长礼. 对黏性土孔隙水渗流规律本质的新认识[J]. 地球学报, 2003, 24(1): 91 - 95.(WANG Xiuyan, LIU Changli. New understanding of the regularity of water seepage in cohesive soil[J]. *Acta Geoscientica Sinica*, 2003, 24(1): 91 - 95.(in Chinese))
- [12] 齐添, 谢康和, 胡安峰, 等. 萧山黏土非达西渗流性状的试验研究[J]. 浙江大学学报(自然科学版), 2007, 41(6): 1 023 - 1 028.(QI Tian, XIE Kanghe, HU Anpeng, et al. Laboratorial study on non-Darcy seepage in Xiaoshan clay[J]. *Journal of Zhejiang University(Engineering Science)*, 2007, 41(6): 1 023 - 1 028.(in Chinese))
- [13] DENG Y E, XIE H P, HUANG R Q, et al. Law of nonlinear flow in saturated clays and radial consolidation[J]. *Applied Mathematics and Mechanics*, 2007, 28(11): 1 427 - 1 436.
- [14] HANSBO S. Aspects of vertical drain design: Darcian or non-Darcian flow[J]. *Geotechnique*, 1997, 47(5): 983 - 992.
- [15] 谢海澜, 武强, 赵增敏, 等. 考虑非达西流的弱透水层固结计算[J]. 岩土力学, 2007, 28(5): 1 061 - 1 065.(XIE Hailan, WU Qiang, ZHAO Zengmin, et al. Consolidation computation of aquitard considering non-Darcy flow[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2007, 28(5): 1 061 - 1 065.(in Chinese))
- [16] 刘忠玉, 刘忠广, 马崇武. 考虑起始水力梯度时饱和黏土的一维固结[J]. 郑州大学学报(工学版), 2006, 27(3): 21 - 24.(LIU Zhongyu, LIU Zhongguang, MA Chongwu. One-dimensional consolidation of saturated clays considering initial hydraulic gradient[J]. *Journal of Zhengzhou University(Engineering Science)*, 2006, 27(3): 21 - 24.(in Chinese))
- [17] 刘忠玉, 杨荣根. 考虑起始水力梯度时双层地基的一维固结[J]. 合肥工业大学学报(自然科学版), 2006, 29(5): 568 - 572.(LIU Zhongyu, YANG Ronggen. One-dimensional consolidation of double-layered ground considering the initial hydraulic gradient[J]. *Journal of Hefei University of Technology(Natural Science)*, 2006, 29(5): 568 - 572.(in Chinese))
- [18] 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 Zhongyu, ZHANG Tianhang, MA Chongwu. Effect of initial hydraulic gradient on one-dimensional consolidation of saturated clays[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2007, 28(3): 467 - 470.(in Chinese))
- [19] 施建勇, 问延煦, 雷国辉, 等. 固结试验及其相关问题的讨论[J]. 河海大学学报(自然科学版), 2004, 32(2): 213 - 215.(SHI Jianyong, WEN Yanxu, LEI Guohui, et al. Discussion on consolidation test and some relative problems[J]. *Journal of Hohai University(Nature Science)*, 2004, 32(2): 213 - 215.(in Chinese))
- [20] 李人宪. 有限体积法基础[M]. 北京: 国防工业出版社, 2005.(LI Renxian. Fundamental of finite volume method[M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2005.(in Chinese))
- [21] 马崇武, 刘忠玉, 王卫平. 非达西渗流时一维固结方程的两种数值解法[J]. 兰州理工大学学报, 2007, 33(3): 128 - 131.(MA Chongwu, LIU Zhongyu, WANG Weiping. Two numerical solutions of one-dimensional consolidation equation of non-Darcy flow[J]. *Journal of Lanzhou University of Technology*, 2007, 33(3): 128 - 131.(in Chinese))