

文章编号: 1000-7598 (2011) 02-0553-07

# 变荷载下基于指数形式渗流的一维固结分析

李传勋<sup>1,2</sup>, 谢康和<sup>2</sup>, 卢萌盟<sup>3,4</sup>, 王 坤<sup>2</sup>

(1.江苏大学 土木工程系, 江苏 镇江 212013; 2.浙江大学 软弱土与环境土工教育部重点实验室, 杭州 310027;  
3.中国矿业大学 深部岩土力学与地下工程国家重点实验室, 江苏 徐州 221008; 4.中国矿业大学 建筑工程学院, 江苏 徐州 221008)

**摘 要:** 建立了考虑指数形式渗流以及变荷载条件下的一维固结微分方程, 采用相对稳定的 Crank-Nicolson 差分格式获得控制方程的差分解答并验证了计算程序的可靠性。结果表明, 当指数大于 1 时, 较小时间因子下固结速率比达西渗流快, 较大时间因子下固结速率比达西渗流慢; 而当指数小于 1 时, 较小时间因子下固结速率比达西渗流慢, 较大的时间因子下固结速率比达西渗流快。在土层厚度相同的情况下, 指数大于 1 时作用于土层的荷载越小, 固结速率越慢; 基于指数形式渗流, 统一一维固结理论中室内土样固结与实际地基土层固结之间的相似关系不再成立; 加荷速率越快, 则土层的固结速率越快。

**关 键 词:** 一维固结; 有限差分法; 指数形式渗流; 变荷载;

**中图分类号:** U 416.1

**文献标识码:** A

## One-dimensional consolidation analysis considering exponential flow law and time-depending loading

LI Chuan-xun<sup>1,2</sup>, XIE Kang-he<sup>2</sup>, LU Meng-meng<sup>3,4</sup>, WANG Kun<sup>2</sup>

(1. Department of Civil Engineering Jiangsu University, Zhenjiang, Jiangsu 212013, China; 2. MOE Key Laboratory of Soft Soils and Geoenvironmental engineering, Zhejiang University, Hangzhou 310027, China; 3. State Key Laboratory for Geomechanics and Deep Underground Engineering, China University of Mining & Technology, Xuzhou, Jiangsu 221008, China; 4. School of Architecture & Civil Engineering, China University of Mining & Technology, Xuzhou, Jiangsu 221008, China)

**Abstract:** The differential equation governing one-dimensional consolidation was modified to consider exponential flow law and time-depending load. Finite difference solution was acquired by Crank-Nicolson difference scheme which was relatively stability. The reliability of difference programming was verified by comparing the results with analytic solutions. The results show that, if the exponent is greater than 1, the rate of consolidation is faster than the case of Darcy's flow at short time factor, slower than the case of Darcy's flow at long time factor. On the contrary, if the exponent is less than 1, the rate of consolidation is slower than the case of Darcy's flow at short time factor, faster than the case of Darcy's flow at long time factor. If the exponent is greater than 1, the less the load, the slower the consolidation rate for the same soil layer. At the case of exponential flow law, the classical similitude between consolidation of laboratory samples and that of field layers is not satisfied. The faster the loading rate, the faster the consolidation rate.

**Key words:** one-dimensional consolidation; finite difference method; exponential flow law; time-depending load

## 1 引 言

自从 Terzaghi 创建一维固结理论以来, 以方便、简洁、易于掌握等优点在工程实践中得到了广泛的应用, 目前地基的固结变形仍然广泛采用该理论进行计算。但 Terzaghi 理论存在很多假设, 这些假设有时并不能反映土体的真实性状。例如, 它认为渗流速度总是与水力坡降呈线性关系, 这与室内渗透试验及现场观测是不相符合的<sup>[1-7]</sup>。室内试验与现场观测均表明, 软黏土中的渗流偏离达西定律的现

象是存在的, 这种现象被 Hansbo<sup>[2]</sup>称为非达西渗流, 因此研究基于非达西渗流的一维固结理论具有一定的理论和现实意义。

基于非达西渗流一维固结微分方程一般是 2 阶非线性偏微分方程, 很难求得满足全部求解条件的解析解, 所以大多数情况下只能应用数值计算方法进行求解<sup>[8-15]</sup>。刘忠玉<sup>[8]</sup>、鄂健<sup>[9]</sup>引入 Hansbo 渗流模式并应用不同分析方法对一维固结进行求解, 并对不同参数下的一维固结性状进行了分析, 得到了不同于传统固结理论的结论; 谢海澜<sup>[10]</sup>基于 Hansbo

收稿日期: 2010-02-04

基金项目: 国家自然科学基金资助 (No. 50878191)。

第一作者简介: 李传勋, 男, 1978 年生, 博士研究生, 讲师, 主要从事软黏土力学及地基处理的研究。E-mail: lichuanxun@yeah.net

渗流采用解析与数值相结合的半解析方法，对一维固结问题进行求解，并分析了固结性状。此外，如果忽略 Hansbo 渗流的指数部分，就退化为考虑存在起始坡降的渗流模式，Pascal<sup>[11]</sup>、刘忠玉<sup>[12]</sup>基于此渗流模式对一维固结进行了分析计算。

Slepicka<sup>[5]</sup>提出了指数形式渗流定律，即  $v=kt^m$ ，当水力坡降  $i$  较大时， $m<1$ ；当水力坡降  $i$  很小时， $m>1$ ；当  $i$  介于两者之间时， $m=1$ ，此时也就是达西定律。Schmidt<sup>[13]</sup>基于该指数形式渗流定律给出了渗流对土层底部没有影响时的短时间解析解和长时间近似解，可以知道这样的长时间近似解并不能完全满足偏微分方程，而且短时间解析解和长时间下的近似解都不能考虑实际工程中广泛存在的变荷载作用。本文基于该指数形式渗流在变荷载作用下给出了软黏土一维固结有限差分解，并对单级加载情况下的一维固结性状进行了分析。

## 2 控制方程的建立

### 2.1 基本假定

除了土中渗流服从指数渗流定律以及外荷载是逐渐施加之外，其余基本假定均与 Terzaghi 一维固结理论相同。

### 2.2 控制方程的建立及求解条件

厚度为  $H$  的饱和均质软黏土层，受到逐渐施加的均布荷载  $q(t)$  的作用，顶面是透水的，底面是透水或者不透水，如图 1、2 所示。

在地基中任意取一单元体，单元土体中的渗流定律用指数形式可以表示为

$$v = -k \left( \frac{1}{\gamma_w} \frac{\partial u}{\partial z} \right)^m \quad (1)$$

式中： $k$  为渗透系数； $m$  为指数形式渗流的指数；可以通过试验确定； $u$  为孔隙水压力； $\gamma_w$  为水的重度； $m_v$  为土的压缩系数。

根据流出与流入单元体的流量差应该等于单元土体体积变化这一连续条件，可以可得

$$\frac{\partial v}{\partial z} = m_v \left( \frac{dq}{dt} - \frac{\partial u}{\partial t} \right) \quad (2)$$

把式 (1) 代入到式 (2) 中，可以得到一维固结控制微分方程：

$$\frac{km}{\gamma_w m_v} \left( \frac{1}{\gamma_w} \frac{\partial u}{\partial z} \right)^{m-1} \left( \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} \right) = \frac{\partial u}{\partial t} - \frac{dq}{dt} \quad (3)$$

其求解条件

$$\left. \begin{aligned} &\text{边界条件:} \\ &u(0, t) = 0, t > 0; \left. \frac{\partial u}{\partial z} \right|_{z=H} = 0 \text{ (底面不透水)} \\ &u(H, t) = 0, t > 0 \text{ (底面透水)} \end{aligned} \right\} (4)$$

$$\text{初始条件: } u(z, 0) = q_0 \quad (5)$$

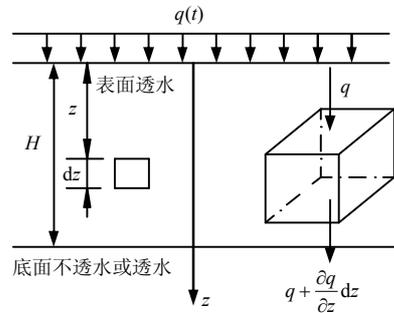


图 1 地基荷载边界情况及单元体示意图

Fig.1 Loading and boundary conditions of soil layer and sketch of unit body

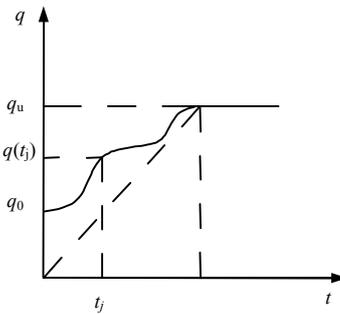


图 2 荷载与时间关系曲线

Fig.2 Curves of load vs. time

## 3 方程的差分求解及固结度的计算

### 3.1 控制方程无量纲化

令  $U = \frac{u}{q_u}$ ,  $Z = \frac{z}{H}$ ,  $T_v = \frac{kt}{\gamma_w m_v H^2} = \frac{c_v t}{H^2}$ ,  $T_{vc} = \frac{kt_c}{\gamma_w m_v H^2} = \frac{c_v t_c}{H^2}$ ,  $Q = \frac{q(t)}{q_u}$ ,  $q_h = \frac{q_u}{\gamma_w H}$ , 控制方程可以无量纲化为

$$m \left( q_h \frac{\partial U}{\partial Z} \right)^{m-1} \left( \frac{\partial^2 U}{\partial Z^2} \right) = \frac{\partial U}{\partial T} - \frac{dQ}{dT} \quad (6)$$

式中： $q_h$  为表征所施加的变荷载的最大值的等效水头与土层厚度的比值，荷载越小、土层厚度越厚，则  $q_h$  值越小。无量纲化后控制方程求解条件变为

边界条件：

$$\left. \begin{aligned} &U(0, T) = 0, T_v > 0; \left. \frac{\partial U}{\partial Z} \right|_{Z=1} = 0, \text{ (底面不透水)} \\ &U(1, T) = 0, \text{ (底面透水)} \end{aligned} \right\} (7)$$

$$\text{初始条件: } U(Z, 0) = Q^0 = q_0/q_u \quad (8)$$

### 3.2 差分方程的建立及求解

鉴于 Crank-Nicolson 差分格式的稳定性，所以建立基于 Crank-Nicolson 差分格式的差分方程。首先对土层进行空间、时间离散， $i, j$  分别为空间和时间节点， $i=0, 1, 2, 3, \dots, n; j=0, 1, 2, 3, \dots$ 。空间节点 0 代表土层的表面，时间节点 0 代表初始时刻，空间步长为  $h$ ，时间步长  $\tau$ 。荷载在初始时刻记为  $Q^0$ ，则  $Q^0 = q_0/q_u$ ；在  $t_j$  时刻记为  $Q^j$ ，则  $Q^j = q(t_j)/q_u$ ，如图 2 所示。本文以单级等速加荷为例对荷载进行离散。

$$Q^j = \begin{cases} j\tau/T_{vc}, & (j\tau \leq T_{vc}) \\ 1, & (j\tau \geq T_{vc}) \end{cases}, (j=1, 2, 3, \dots, Q^0 = 0) \quad (9)$$

令  $\lambda = \tau/h^2$ ，应用 Crank-Nicolson 的差分格式，将方程式 (4) 离散为如下的差分方程：

$$\begin{aligned} \lambda \alpha_i^j U_{i-1}^j - 2[1 + \lambda \alpha_i^j] U_i^j + \alpha_i^j \lambda U_{i+1}^j = \\ 2[\alpha_i^{j-1} \lambda - 1] U_i^{j-1} - \lambda \alpha_i^{j-1} U_{i+1}^{j-1} - \\ \lambda \alpha_i^{j-1} U_{i-1}^{j-1} - 2(Q^j - Q^{j-1}) \end{aligned} \quad (10)$$

其中：

$$\left. \begin{aligned} \alpha_i^j &= m \left( q_h \frac{U_{i+1}^j - U_{i-1}^j}{2h} \right)^{m-1} \\ \alpha_i^{j-1} &= m \left( q_h \frac{U_{i+1}^{j-1} - U_{i-1}^{j-1}}{2h} \right)^{m-1} \end{aligned} \right\} \quad (11)$$

式中： $U_i^j$  为第  $i$  个节点在  $t_j$  时刻孔隙水压力的无量纲值。

相应的求解条件用离散点可以表示为  
初始条件：

$$U_i^0 = 0, (i=1, 2, 3, \dots, n) \quad (12)$$

边界条件：

$$\left. \begin{aligned} U_0^j &= 0, U_{n-1}^j = U_{n+1}^j, (\text{底面不透水}) \\ U_n^j &= 0, (\text{底面透水}) \\ (j &= 1, 2, 3, \dots) \end{aligned} \right\} \quad (13)$$

计算时会遇到渗流速度为 0（在单面排水情况下底面和双面排水情况下中间平面处渗流速度为 0）的情况，此时解差分方程会出现数学的困难。众所周知，不论达西渗流还是指数形式的渗流，流速和水力坡降之间的关系曲线都是通过原点的。为了回避这个数学上的难题，在流速为 0 时，渗流按遵从达西定律进行计算，从而能够解决这一问题。对

于单面排水情况下差分方程和边界条件应用矩阵形式可以表示为

$$\{A\}^j \{U\}^j = \{B\}^{j-1}, (j=1, 2, 3, \dots) \quad (14)$$

矩阵中：

$$\left. \begin{aligned} A_{ii} &= -2[1 + \lambda \alpha_i^j]; A_{i(i-1)} = A_{i(i+1)} = \lambda \alpha_i^j \\ A_{nn} &= -2(1 + \lambda); A_{n(n-1)} = 2\lambda \\ B_n &= 2(\lambda - 1)U_n^{j-1} - 2\lambda U_{n-1}^{j-1} - 2(Q^j - Q^{j-1}) \\ B_i &= 2[\lambda \alpha_i^{j-1} - 1]U_i^{j-1} - 2(Q^j - Q^{j-1}) - \\ &\quad \lambda \alpha_i^{j-1} U_{i+1}^{j-1} - \lambda \alpha_i^{j-1} U_{i-1}^{j-1} \end{aligned} \right\} \quad (15)$$

式中： $i=1, 2, \dots, n-1$ 。

同样，对于双面排水差分方程和边界条件应用矩阵形式可以表示为

$$\{A\}^j \{U\}^j = \{B\}^{j-1}, (j=1, 2, 3, \dots) \quad (16)$$

矩阵中：

$$\left. \begin{aligned} A_{ii} &= -2(1 + \lambda \alpha_i^j); A_{i(i-1)} = A_{i(i+1)} = \alpha_i^j \lambda \\ B_i &= 2(\lambda \alpha_i^{j-1} - 1)U_i^{j-1} - \lambda \alpha_i^{j-1} U_{i+1}^{j-1} - \\ &\quad \lambda \alpha_i^{j-1} U_{i-1}^{j-1} - 2(Q^j - Q^{j-1}) \\ B_n &= 0; A_{nn} = 1; A_{n(n-1)} = 0 \end{aligned} \right\} \quad (17)$$

式中： $i=1, 2, \dots, n-1$ 。

方程组 (14)、(16) 是关于未知数  $U_i^j$  的非线性方程，因此必须采用迭代法进行求解，迭代初始值采用前一时刻的孔压，即  $U_i^{j-1}$ 。应用  $U_i^{j-1}$  计算矩阵  $A$ ，已知矩阵  $A$  后可采用追赶法进行求解方程，从而得到  $U_i^j$ ，然后利用求得的  $U_i^j$  再次计算矩阵  $A$ ，并进行下一次迭代，直到满足计算精度为止。通常情况下，计算过程中时间步长取  $\tau = 0.00001$ ，空间步长取  $h = 0.01$ ，一般迭代 2 次就可满足要求。

孔压得到解答之后，就可以得到固结度的表达式。按孔压（或者说是按应力）定义的固结度：

$$U_p = \begin{cases} \frac{\frac{1}{H} \int_0^H (q(t) - u) dz}{q_u} = \frac{T_v}{T_{vc}} - \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \left( \frac{U_i + U_{i-1}}{2} \right), & (T_v < T_{vc}) \\ \frac{\frac{1}{H} \int_0^H (q(t) - u) dz}{q_u} = 1 - \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \left( \frac{U_i + U_{i-1}}{2} \right), & (T_v \geq T_{vc}) \end{cases} \quad (18)$$

按变形定义的固结度：

$$U_s = \begin{cases} \frac{\int_0^H \varepsilon_z dz}{\int_0^H \varepsilon_{z\infty} dz} = \frac{\int_0^H (q(t)-u)m_v dz}{\int_0^H q_u m_v dz} = \frac{T_v}{T_{vc}} - \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{U_i + U_{i-1}}{2}, (T_v < T_{vc}) \\ \frac{\int_0^H \varepsilon_z dz}{\int_0^H \varepsilon_{z\infty} dz} = \frac{\int_0^H (q(t)-u)m_v dz}{\int_0^H q_u m_v dz} = 1 - \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{U_i + U_{i-1}}{2}, (T_v \geq T_{vc}) \end{cases} \quad (19)$$

从表达式可以看出，基于指数形式渗流的均质土一维固结按变形定义的固结度和按孔压定义的固结度二者是相等的，即孔压消散的速率和沉降变形的速率是同步的。

### 4 计算程序的验证

#### 4.1 与基于 Darcy 渗流下的解析解的对比验证

指数形式渗流当  $m=1$  时就退化为达西渗流，此情况下一维固结问题能够获得解析解答，将  $m=1$ ， $T_{vc}=0.1$  情况下差分程序计算结果与解析解对比，对比结果见表 1。

表 1 差分计算固结度与 Darcy 渗流下的解析解对比  
Table 1 Comparison of degree of consolidation between the results by FDM and analytic solution based on Darcy's flow

时间因子 $T_v$	Darcy 渗流解析解/%	差分计算结果/%
0.045	7.230	7.235
0.085	18.742	18.748
0.161	37.261	37.263
0.221	46.490	46.492
0.304	56.528	56.529
0.418	67.181	67.182
0.574	77.674	77.674
0.788	86.846	86.846
1.083	93.641	93.641

由表 1 可以看出，计算结果的误差不超过 0.01%，这也说明了计算程序的框架是可靠的。值得注意的是，在  $m=1$  的情况下非线性渗流转化为线性渗流，因此，表 1 并不足以说明在非线性条件下计算程序的可靠性。

#### 4.2 与短时间解析解的对比验证

根据 Schmidt<sup>[13]</sup>给出的基于非线性渗流的短时间解析解求解方法，本文给出了在  $T_{vc}=0$ ， $m$  分别等于 0.5 和 1.5 情况下式 (3) 的短时间固结度解析解。当  $m=0.5$ ，在满足时间因子  $T_v < 0.146(q_h)^{0.5}$  条件下（即地基地面的超孔隙水压力没有发生变化），可以求得固结度的解析表达式为

$$U_s = 1.221(q_h)^{-1/3} T_v^{2/3} \quad (20)$$

将  $T_{vc}=0$ ， $m=0.5$ ， $q_h=1$  时的短时间解析解与差分计算结果相对比，对比结果见表 2， $T_{vc}=0$ ， $m=0.5$ ， $q_h=1$ 。

当  $m=1.5$ ，在满足时间因子  $T_v < 0.04869(q_h)^{-0.5}$  条件下，可得到固结度的解析表达式为

$$U_s = 1.04686(q_h)^{0.2} T_v^{0.4} \quad (21)$$

将  $T_{vc}=0$ ， $m=1.5$ ， $q_h=1$  时的短时间解析解与差分计算结果相对比，对比结果见表 3， $T_{vc}=0$ ， $m=1.5$ ， $q_h=1.5$ 。从表 2、3 可以看出，基于指数形式的一维固结差分程序计算结果与解析解相比最大误差不足 0.1%，这也说明所编制的差分计算程序的计算结果是可靠的。

表 2 差分计算固结度与短时间解析解对比  
Table 2 Comparison of degree of consolidation between the results by FDM and short term analytic solution

时间因子 $T_v$	Schmidt 解析解/%	差分计算结果/%
0.004	2.870	2.899
0.009	5.364	5.369
0.017	8.204	8.215
0.033	12.544	12.527
0.045	15.502	15.488
0.062	19.158	19.065
0.085	23.674	23.649
0.117	29.258	29.231
0.146	33.890	33.803

表 3 差分计算固结度与短时间解析解对比  
Table 3 Comparison of degree of consolidation between the results by FDM and short term analytic solution

时间因子 $T_v$	Schmidt 解析解/%	差分计算结果/%
0.004	11.957	11.912
0.005	13.527	13.524
0.007	15.330	15.355
0.009	17.403	17.434
0.013	19.798	19.783
0.017	22.456	22.464
0.024	25.538	25.511
0.033	28.972	28.967
0.040	31.265	31.260

## 5 固结性状分析

### 5.1 参数 $m$ 对固结性状影响分析

从图 3 可以看出， $m$  值偏离 1 越多，固结曲线偏离达西渗流越多。在时间因子较小的情况下，当  $m$  值小于 1 时，考虑指数形式渗流要比达西渗流固

结速率慢；当  $m > 1$  时，要比达西渗流固结速率快。在时间因子较大的情况下，当  $m < 1$  时，考虑指数形式渗流要比达西渗流解固结速率快；当  $m$  值大于 1 时，要比达西渗流固结速率慢。但随着加荷速率的减慢，如图 4 所示， $T_{vc} = 0.10$  时，随着  $m$  值的变化，固结曲线在小时间因子下偏离达西渗流下的固结曲线并不明显。出现上述的这些现象，主要是由于在较小的时间因子下土层中的水力坡降比较大且大于 1，当  $m < 1$  时，土中水的消散速率要比达西渗流慢；当  $m > 1$  时，土中水的消散速率要比达西渗流快。相反，在较大的时间因子下，随着孔压的消散，土层中的水力坡降逐渐变小且小于 1；在  $m < 1$  的情况下土中水消散速率要比达西渗流快，在  $m > 1$  的情况下，土中水消散速率要比达西渗流慢。加荷速率的减慢实际上降低了水力坡降增加的速率，因此在小时间因子下不会明显偏离达西渗流下的固结曲线。

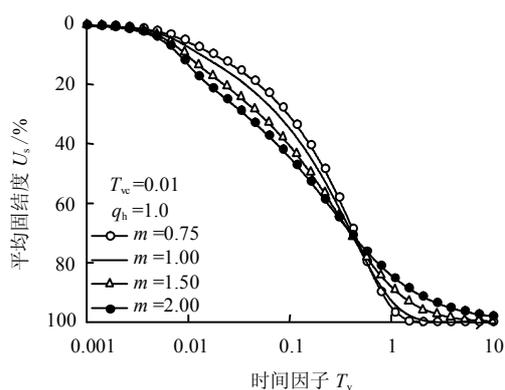


图 3 不同  $m$  值  $T_{vc} = 0.01$  时固结度与时间因子关系曲线  
Fig.3 The curves of degree of consolidation vs.  $T_v$  under different values of  $m$  and  $T_{vc} = 0.01$

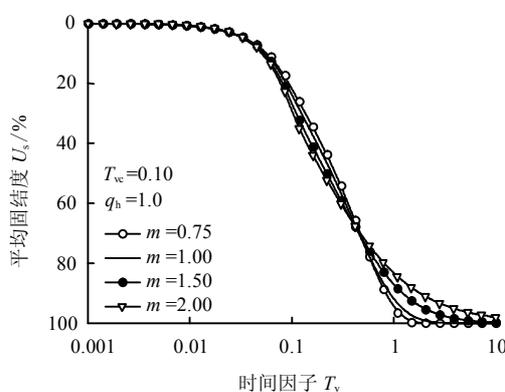


图 4 不同  $m$  值  $T_{vc} = 0.10$  时固结度与时间因子关系曲线  
Fig.4 The curves of degree of consolidation vs.  $T_v$  under different values of  $m$  and  $T_{vc} = 0.1$

### 5.2 参数 $q_h$ 对固结性状影响分析

从式 (4) 可以看出，参数  $q_h$  对固结性状也有一定的影响，如图 5、6 所示。从图 5 可以看出，在  $m = 1.50$  的情况下， $q_h$  值越大，则固结的速率越快； $q_h$  值越小，则固结的速率越慢。也就是说，如果在地基土层厚度一定的情况下，施加于地基的荷载越大，则地基土层的固结速率越快；如果在施加于地基上荷载一定的情况下，地基土层厚度越厚，在相同的时间因子下，则地基的固结速率越慢。当  $m = 0.50$  时，如图 6 所示， $q_h$  值越大，则土层的固结速率越慢； $q_h$  值越小，则固结速率越快。也就是说，如果在地基土层厚度一定的情况下，施加于地基的荷载越大，则地基土层的固结速率越慢；如果在施加于地基上荷载一定的情况下，地基土层厚度越厚，在相同的时间因子下，则地基的固结速率越快。

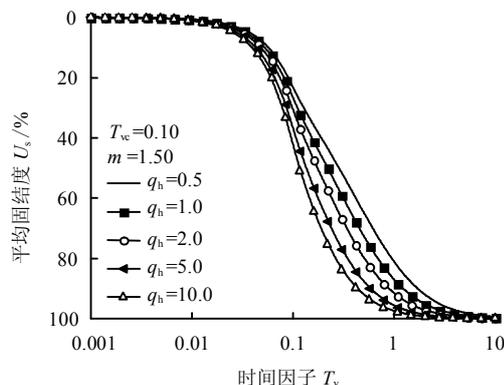


图 5 不同  $q_h$  值  $m = 1.5$  时固结度与时间因子关系曲线  
Fig.5 The curves of degree of consolidation vs.  $T_v$  under different values of  $q_h$  and  $m = 1.5$

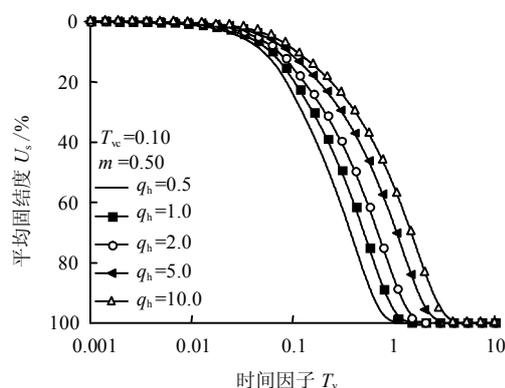


图 6 不同  $q_h$  值  $m = 0.5$  时固结度与时间因子关系曲线  
Fig.6 The curves of degree of consolidation vs.  $T_v$  under different values of  $q_h$  and  $m = 0.5$

这样的固结性状与传统基于达西渗流定律的固结性状完全不同。在传统的固结理论中，作用于地基上荷载的大小对固结速率是没有影响的。同时，

在传统固结理论中,只要时间因子相同,地基土层的固结度就是相等的。但基于指数形式渗流定律的一维固结,传统固结理论中的室内土样固结与现场土层固结之间的相似关系不再成立。同时,上述的固结性状也在某种程度解释了在小荷重下 Terzaghi 理论值与实测值存在较大偏差的原因。

### 5.3 加荷速率对固结性状影响分析

在基于达西渗流固结理论中,加荷速率对固结快慢有很大影响,施工速度越快,则地基的固结速率越快。在考虑指数渗流的情况下,加荷速率同样对固结速率有很大影响(图7、8)。图7中  $m=1.50$ ,  $q_h=1$  时不同  $T_{vc}$  下的固结曲线表明,加荷速度越快,则在相同的时间因子下固结度越大,这一固结性状是与 Terzaghi 固结理论完全相同的。图8中  $m=0.50$ 、 $q_h=1$  时不同  $T_{vc}$  下的固结曲线同样也表明,加荷速率越快,在相同的时间因子下固结度越大,这一固结性状与  $m=1.50$  时不同  $T_{vc}$  下的固结性状是相同的。

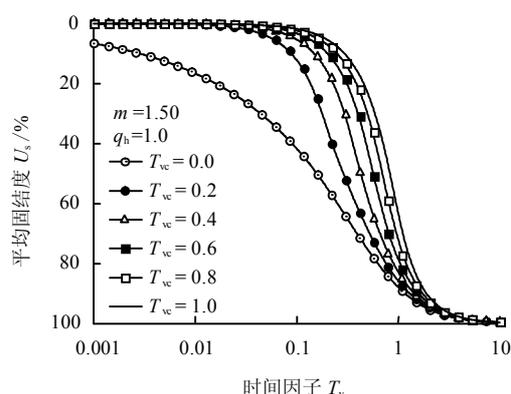


图7 不同  $T_{vc}$  值  $m=1.50$  时固结度与时间因子关系曲线  
Fig.7 The curves of degree of consolidation vs.  $T_v$  under different values of  $T_{vc}$  and  $m=1.50$

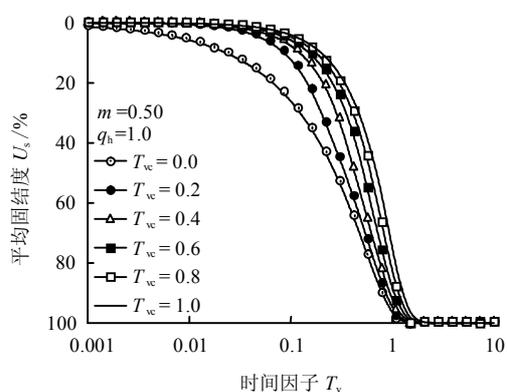


图8 不同  $T_{vc}$  值  $m=0.50$  时固结度与时间因子关系曲线  
Fig.8 The curves of degree of consolidation vs.  $T_v$  under different values of  $T_{vc}$  and  $m=0.50$

## 6 结论

(1) 在地基土层厚度一定的情况下,变荷载作用下考虑指数形式渗流的一维固结性状的影响因素包括渗流的指数大小、作用于地基上的上部荷载大小以及变荷载的加荷速率。

(2) 在时间因子较小的情况下,  $m < 1$  时固结速率要比达西渗流慢,而  $m > 1$  时固结速率要比达西渗流快。相反,在时间因子较大的情况下,  $m < 1$  时固结速率要比达西渗流快,而  $m > 1$  时固结速率要比达西渗流慢,且  $m$  值偏离 1 越多,固结曲线偏离达西渗流越多。

(3) 在地基土层厚度一定的情况下,作用于地基上的荷载对固结性状有很大的影响,荷载越大,则固结速率越快。

(4) 加荷速率对固结性状也有很大影响,施工速率越快,地基的固结速率也越快。

(5) 土层厚度对地基固结有重要的影响,在相同的时间因子下不同厚度的土层在相同的荷载作用下其固结速率不再相等。传统固结理论中室内土样固结与地基土层固结之间的相似关系不再成立。

## 参考文献

- [1] HANSBO S. Deviation from Darcy's law observed in one-dimensional consolidation[J]. *Geotechnique*, 2003, 53(6): 601-605.
- [2] HANSBO S. Consolidation of clay with special reference to influence of vertical drains[J]. *Swedish Geotechnical Institute*, 1960, 18: 45-50.
- [3] SWARTZENDRUBER D. Modification of Darcy's law for the flow of water in soils[J]. *Soil Science*, 1962, 93(1): 22-29.
- [4] DUBIN B, MOULIN G. Influence of a critical gradient on the consolidation of clays[C]//Consolidation of Soils: Testing and Evaluation. West Conshohocken (PA): American Society for Testing and Materials, 1986: 354-77.
- [5] SLEPICKA F. Contribution to the solution of the filtration law[C]//International Union of Geodesy and Geophysics, Commission of Subterranean Waters. Finland: [s. n.], 1960: 245-258.
- [6] HANSBO S. Consolidation equation valid for both Darcian and non-Darcian flow[J]. *Geotechnique*, 2001, 51(1): 51-54.

- [7] 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(工学版), 2007, 41(6): 1023—1028.  
QI Tian, XIE Kang-he, HU An-feng, et al. Laboratorial study on non-Darcy seepage in Xiaoshan clay[J]. **Journal of Zhejiang University (Engineering Science)**, 2007, 41(6): 1023—1028.
- [8] 刘忠玉, 孙丽云, 乐金朝, 等. 基于非 Darcy 渗流的饱和黏土一维固结理论[J]. 岩石力学与工程学报, 2009, 28(5): 973—979.  
LIU Zhong-yu, SUN Li-yun, YUE Jin-chao, et al. One-dimensional consolidation theory of saturated clay based on non-Darcy flow[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2009, 28(5): 973—979.
- [9] 鄂建, 陈刚, 孙爱荣. 考虑低速非 Darcy 渗流的饱和黏性土一维固结分析[J]. 岩土工程学报, 2009, 31(7): 1115—1119.  
E Jian, CHEN Gang, SUN Ai-rong. One-dimensional consolidation of saturated cohesive soil considering non-Darcy flows[J]. **Chinese Journal of Geotechnical Engineering**, 2009, 31(7): 1115—1119.
- [10] 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): 1061—1065.  
XIE Hai-lan, WU Qiang, ZHAO Zeng-min, et al. Consolidation computation of aquitard considering non-Darcy flow[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2007, 28(5): 1061—1065.
- [11] PASCAL F, PASCAL H, MURRAY D W. Consolidation with threshold gradients[J]. **International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics**, 1981, 5(3): 247—261.
- [12] 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 Zhong-yu, LIU Zhong-guang, MA Chong-wu. One-dimensional consolidation of saturated clays considering initial hydraulic gradient[J]. **Journal of Zhengzhou University (Engineering Science)**, 2006, 27(3): 21—24.
- [13] SCHMIDT J D, WESTMANN R A. Consolidation of porous media with non-Darcy flow[J]. **Journal of the Engineering Mechanics Division**, 1973, (EM6): 1201—1216.
- [14] ELNAGGAK H A, KRIZEK R J. Effect of non-Darcy flow on time rate of consolidation[J]. **Journal of the Franklin Institute**, 1973, 296(5): 323—337.
- [15] CHERUBINI C, VACCA G, GIASI CI. Modeling non-Darcian flow in one-dimensional consolidation[J]. **Computers and Geotechnics**, 1988, 6(4): 247—264.