

非饱和土一维固结简化计算

杨代泉 沈珠江

(南京水利科学研究院土工所)

一、前言

众所周知,岩土工程中常用的固结理论有太沙基固结理论,比奥固结理论及 Флорин, В. А. 固结理论等,所有这些理论只适用于理想饱和土或孔隙气体呈封闭状态的准饱和土。对于广泛存在于大自然中的孔隙气和孔隙水能独自流动的各种非饱和土,目前尚无相应可行的固结理论。

国外从60年代开始研究非饱和土固结问题,典型的有 Scott, R. F.^[1], Barden, L.^[2], Fredlund, D. G.^[3], 以及 Lloret, A.^[4]等人提出的固结方程。其中最为流行的为 Fredlund 固结理论。Fredlund 及其同事从太沙基固结理论出发,同时考虑孔隙气和孔隙水流动,依据非饱和土相(固相、水相、气相)的体应变本构方程,建立了描述孔隙水压力消散与孔隙气压力消散的偏微分方程组。该理论的最大优点在于它放弃了有异议的非饱和土有效应力原理,代之以两个独立的应力状态变量 $(\sigma - u_a)$ -外加应力,和 $(u_a - u_w)$ -吸力来建立非饱和土各相的体应变本构方程,但是该理论存在的缺点也很突出,首先,为了导出孔隙压力消散方程,采用了过多的与实际情况不太相符的简化假设,因此,它的适用范围不大;其次,对于为求解孔隙压力消散方程所必须的孔隙水相体应变本构方程的建立问题,至今还没解决。

国内在这方面也有几位学者不同程度地进行过一些试验研究^[5-7]。他们的研究表明,气相的存在是导致非饱和土力学性质复杂化的主要原因,气相形态与孔隙压力消散有着密切的关系。根据文献[6]的试验结果不难发现,当土体含水量小于最优含水量时,土体受力主要是使大孔隙压缩及孔隙气体排出,孔隙水则始终处于张力状态,于是孔隙水不可能排出,但可以发生内部的水分迁移。当土体含水量处于最优值附近时,土体受力后进入气相内部连通阶段,该阶段的孔隙气压力消散速率显著变慢,排泄过程中除气体外可同时观测到水分的排出,但仍然以排气为主,孔隙水压 (u_w) 和孔隙气压 (u_a) 在数值上已很相近,不过它们的绝对值与外加压力相比仍不太大。当土的含水量大于最优值时,孔隙气体呈封闭状态,并且随孔隙水一起运动。以上所述规律为本文进行非饱和土单向固结简化计算提供了试验依据。

本文给出了一个比较实用的非饱和土一维固结方程组,针对土体饱和度不太高的情况,给出了非饱和土单向固结的简化解析解。同时,就达西定律与孔隙气体的流动关系亦略作了讨论。

二、非饱和土一维固结方程组

(一) 基本假设

为了便于分析和求解, 本文作出下列假设: ①土体是均质的; ②土颗粒与水为不可压缩体; ③土骨架变形属小变形; ④土骨架应力应变呈线性关系; ⑤孔隙水和孔隙气体各自连通, 可在各自的压力梯度作用下流动, 且服从达西定律; ⑥忽略水中溶质以及水气蒸发运动的影响; ⑦外荷重一次瞬时加到土体上, 在固结过程中保持常量不变; ⑧土体变形由瞬时加载引起孔隙气体压缩而产生的瞬时压缩变形, 以及孔隙压力消散而产生的消散固结变形两部分组成, 而不考虑流变性影响; ⑨孔隙气体压缩和溶解分别服从 Boyle, R. 定律和 Henry, W. 定律, 温度因素不考虑。

(二) 非饱和土的孔隙气体流动与达西定律

多孔介质中, 由压力梯度引起的气体流动与液体流动是不同的, 前者由两种不同的流动(即达西流动和滑脱流动)合成。Dullien, F. A. L.^[8]认为, 当平均孔隙半径大于 10^{-3}mm 时, 滑脱流的作用相对达西流的作用可以略去不计。一般壤土和粘土的平均孔隙半径都大于或接近该数量级, 因此, 孔隙气体流动符合达西定律的假设成立。非饱和土的孔隙气体达西流动表达式经推导给出如下(重力项忽略):

$$\frac{\vec{q}_a}{\rho_a} = -k_{as}k_{ra}\frac{1}{\rho_w g}\text{grad}u_a \quad (1)$$

非饱和土的孔隙水达西流动表达式为

$$\frac{\vec{q}_w}{\rho_w} = -k_{ws}k_{rw}\frac{1}{\rho_w g}(\text{grad}u_w + \rho_w g \text{grad}z) \quad (2)$$

式中 $\vec{q}_a$, $\vec{q}_w$ 分别为孔隙气和孔隙水质量通量; k_{as} , k_{ws} 分别为干土孔隙气体渗透系数和饱和土孔隙水渗透系数; ρ_a , ρ_w 分别为孔隙气和孔隙水密度; k_{ra} , k_{rw} 分别为孔隙气体和孔隙水相对渗透系数; g 为重力加速度。

k_{as} 除由试验确定外, 还可以由下式间接导出:

$$k_{as} = k_{ws}\frac{\mu_w}{\mu_a}f_\mu \quad (3)$$

式中 μ_a , μ_w 分别为孔隙气和孔隙水动力粘滞系数; f_μ 为修正参数。

(三) 固结方程组的推导

1. 孔隙水相和孔隙气相质量守恒方程

$$\frac{\partial}{\partial t}(Sn\rho_w) + \text{div}(\vec{q}_w) = 0 \quad (4)$$

$$\frac{\partial}{\partial t}[(1-S)n\rho_a + HSn\rho_a^*] + \text{div}(\vec{q}_a) = 0 \quad (5)$$

将式(4)、(5)应用于单向固结问题, 并假定 $\rho_a^* = \rho_w$, 则有

$$\frac{\partial}{\partial t}(Sn) = \frac{\partial}{\partial z}\left(\frac{k_w}{\rho_w g}\frac{\partial u_w}{\partial z}\right) + \frac{\partial}{\partial z}k_w \quad (6)$$

$$\frac{\partial}{\partial t}[\rho_a(1-S+HS)n] = \frac{\partial}{\partial z}\left(\frac{\rho_a}{\rho_w g} k_a \frac{\partial u_a}{\partial z}\right) + H \frac{\partial}{\partial z}\left(\frac{\rho_a}{\rho_w g} k_w \frac{\partial u_w}{\partial z} + \rho_a k_w\right) \quad (7)$$

以上式中 $S, n, k_a (=k_{as}k_{ra}), k_w (=k_{ws}k_{rw})$ 分别为土体饱和度、孔隙率、孔隙气渗透系数和孔隙水渗透系数; H 为气体溶水系数; ρ_a^* 为溶于水中的气体密度, 为简单起见可以假定 $\rho_a^* = \rho_w$ 在恒温情况下, 其表达式可导出如下:

$$\rho_a = \rho_{a0}(1 + u_a/u_{atm}) \quad (8)$$

式中, ρ_{a0} 为温度 T_0 时, 一个大气压力下的气体密度; u_{atm} 为标准大气压力值。

为了求出 u_a, u_w, S, n 4 个未知变量, 需要补充两个土体状态方程, 即土骨架(固相)变形状态方程

$$n = f_n(\sigma - u_a, u_a - u_w, S_0, n_0) \quad (9)$$

和土体吸力状态方程

$$u_a - u_w = P_c(S, n; S_0, n_0) \quad (10)$$

式中 S_0, n_0 分别为初始饱和度和初始孔隙率。 f_n 和 P_c 可以方便地通过试验确定其经验式。

2. 一维固结方程组

联合式(6)~(10), 可得如下非饱和土一维固结方程组

$$\left. \begin{aligned} \frac{\partial}{\partial t}(Sn) &= \frac{\partial}{\partial z}\left(\frac{k_w}{\rho_w g} \frac{\partial u_w}{\partial z}\right) + \frac{\partial}{\partial z} k_w \\ \frac{\partial}{\partial t}[\rho_a(1-S+HS)n] &= \frac{\partial}{\partial z}\left(\frac{\rho_a}{\rho_w g} k_a \frac{\partial u_a}{\partial z}\right) + H \frac{\partial}{\partial z}\left(\frac{\rho_a}{\rho_w g} k_w \frac{\partial u_w}{\partial z} + \rho_a k_w\right) \\ n &= f_n(\sigma - u_a, u_a - u_w, S_0, n_0) \\ u_a - u_w &= P_c(S, n; S_0, n_0) \end{aligned} \right\} \quad (11)$$

三、单向固结方程的简化求解

(一) 初始条件

为了计算固结过程, 首先必须求出土层受瞬时外荷作用时, 在不排气、不排水条件下的初始孔隙气压力和孔隙水压力。设加载前孔隙水压力、孔隙气压力、孔隙率、气体密度和饱和度分别为 $u_{w0}, u_{a0}, n_0, \rho_{a0}$ 和 S_0 ; 瞬时加载 $\Delta\sigma$ 后, 上述变量分别改变为 $u_{wi}, u_{ai}, n_i, \rho_{ai}$ 和 S_{i0} 。据质量守恒原理和基本假设④, 参照方程组(11)则有

$$\left. \begin{aligned} \frac{\partial}{\partial t}(Sn) &= 0 \\ \frac{\partial}{\partial t}[\rho_a(1-S+HS)n] &= 0 \\ n &= n_0 - m_1[(\Delta\sigma - \Delta u_a) + R_s(\Delta u_a - \Delta u_w)] \\ u_a - u_w &= P_c(S, n; S_0, n_0) \end{aligned} \right\} \quad (12)$$

式中 m_1, R_s 为参数; $\Delta u_a = u_{ai} - u_{a0}, \Delta u_w = u_{wi} - u_{w0}$, 由式(8)、(12)联合解出

$$\left. \begin{aligned} \Delta u_a &= \frac{R_2}{(1+R_1)} \Delta\sigma + \frac{1}{(1+R_1)} \Delta P_c(S_i, n_i) \\ \Delta u_w &= \frac{R_2}{(1+R_1)} \Delta\sigma - \frac{R_1}{(1+R_1)} \Delta P_c(S_i, n_i) \end{aligned} \right\} \quad (13)$$

$$\text{式中 } R_1 = \frac{[1 - R_s + \frac{(1 - S_0)n_0 + HS_0n_0}{m_1^s(u_{\text{atm}} + u_{a0} + \Delta u_a)}]}{R_s}, \quad R_2 = \frac{1}{R_s},$$

$$n_i = n_0 - m_1^s[(\Delta\sigma - \Delta u_a) + R_s(\Delta u_a - \Delta u_w)], \quad S_i = \frac{S_0 n_0}{n_i},$$

$$R_s = \frac{m_2^s}{m_1^s}, \quad \Delta P_c = P_c(S_i, n_i) - P_c(S_0, n_0)$$

m_1^s , m_2^s 分别为 $(\sigma - u_a)$ 和 $(u_a - u_w)$ 引起的土骨架压缩系数。通过迭代不难解出方程组(13)。

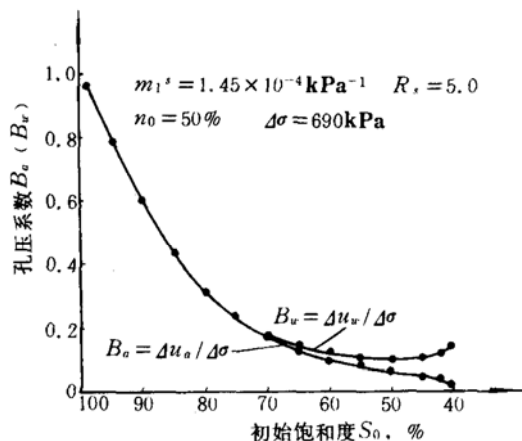


图1 非饱和土孔隙压力系数(B_a, B_w)与初始饱和度(S_0)的关系曲线

图1给出了 $\Delta\sigma=690\text{kPa}$ 时不同起始饱和度和 S_0 与孔隙水压系数 $B_w(\Delta u_w/\Delta\sigma)$ 、孔隙气压系数 $B_a(\Delta u_a/\Delta\sigma)$ 的关系曲线。吸力 $(u_a - u_w)$ 与饱和度(S)的经验式系由清华大学水利系农田水利教研组的土壤中非饱和水运动导水率 K 值的试验数据拟合得到(未考虑孔隙率变化的影响),其表达式为

$$u_a - u_w = 0.929(S^{-5.5486} - 1.0) \text{ (kPa)} \quad (14)$$

本文的计算结果与文献[9]的计算结果都揭示了相同的规律,即随着起始饱和度(S_0)的增大, B_w 和 B_a 渐渐趋向饱和土的孔压系数 $B_a = B_w = B = 1$ 。

(二) 固结方程的简化求解

方程组(11)的求解比较复杂,通过数值计算可以求出其数值解^[10]。下面就方程组(11)进行简化,给出非饱和土孔隙压力消散方程的简化解析解。

文献[5, 6, 11]的研究表明,孔隙气体未进入完全封闭状态之前,有如下特点:①固结过程主要是排气过程;②瞬时外加压力作用后的饱和度变化量与固结过程中的饱和度变化量相比,后者可以不予考虑。为分析简便,特增补两个假设:(a)固结过程中,不考虑饱和度和吸力变化对固结的影响;(b)固结过程中,孔隙水和孔隙气渗透系数均保持为常量。因此,在饱和度不太高的情况下,孔隙气压消散问题是非饱和土固结的关键。

由方程组(11)和补充假设(a), (b)可得

$$n \frac{\partial u_a}{\partial t} + (u_a + u_{\text{atm}}) \frac{\partial n}{\partial t} = \frac{(k_a + Hk_w)}{\rho_w g(1 - S + HS)} \frac{\partial}{\partial z} \left[(u_a + u_{\text{atm}}) \frac{\partial u_a}{\partial z} \right] \quad (15)$$

令 $P_a = u_a + u_{\text{atm}}$, 由孔隙率 n 的经验式和式(15)则有

$$\frac{\partial P_a^2}{\partial t} = J_v \frac{\partial^2 P_a^2}{\partial z^2} \quad (16)$$

式中 $J_v = \frac{(k_a + Hk_w)(u_a + u_{\text{atm}})}{(1 - S + HS)\rho_w g[n + m_1^s(u_a + u_{\text{atm}})]}$, 初始条件及边界条件给定如下:

$$\left. \begin{aligned} u_a(z, 0) &= u_{ai}, \quad 0 < z < H_b \\ \frac{\partial}{\partial z} u_a(0, t) &= 0, \quad u_a(H_b, t) = 0, \quad t \geq 0 \end{aligned} \right\} \quad (17)$$

图2是方程(16)的初始条件及边界条件示意图。由于方程(16)是个非线性偏微分方程,

理论上求解仍有困难。从实用角度考虑, 令 $P = P_a - u_{\text{atm}}$, 式(16)、(17)可以简化为

$$\left. \begin{aligned} \frac{\partial}{\partial t} P &= \tilde{J}_v \frac{\partial^2}{\partial z^2} P \\ P(z, 0) &= u_{ai}(u_{ai} + 2u_{\text{atm}}), \quad 0 < z < H_b \\ \frac{\partial}{\partial t} P(H_b, t) &= 0, \quad P(0, t) = 0, \quad t \geq 0 \end{aligned} \right\} \quad (18)$$

式中
$$\tilde{J}_v = \frac{(k_{ai} + Hk_{wi})(R_a R_{ai} + 1)u_{\text{atm}}}{(1 - S_i + HS_i)[n_i + m_i^2((2R_a - 1)R_{ai} + 1)u_{\text{atm}}]}$$

$$R_a = u_a / u_{ai}, \quad 0 \leq R \leq 1 \quad (19)$$

$$R_{ai} = u_{ai} / u_{\text{atm}}, \quad R_{ai} > 0$$

若令 R_a 为常数, 则 $\tilde{J}_v$ 也为常数。方程(18)的理论解为

$$P = \sum_{m=0}^{\infty} \frac{2u_{ai}(u_{ai} + 2u_{\text{atm}})}{M} \sin M \frac{z}{H_b} \exp(-M^2 \tilde{J}_v) \quad (20)$$

式中 $M = \frac{1}{2}(2m+1)\pi$ 。由变量 P 可求出孔隙气压 u_a 为

$$u_a = \sqrt{P^2 + u_{\text{atm}}^2} - u_{\text{atm}} \quad (21)$$

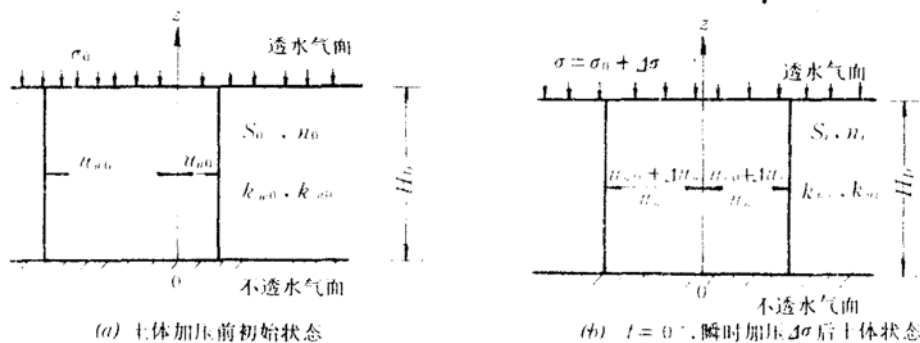


图2 初始条件及边界条件示意图

定义 $\bar{U}_p, \bar{U}_c$ 分别为变量 P 和孔隙气压 u_a 的平均固结度, 其表达式分别为

$$\bar{U}_p = 1 - \frac{\int_0^{H_b} P dz}{\int_0^{H_b} P_i dz}, \quad \bar{U}_c = 1 - \frac{\int_0^{H_b} u_a dz}{\int_0^{H_b} u_{ai} dz} \quad (22)$$

式中 $P_i = u_{ai}(u_{ai} + 2u_{\text{atm}})$ 。

由 $P + u_{\text{atm}}^2 = (u_a + u_{\text{atm}})^2$, 可以导出

$$\bar{U}_c = 1 - (1 + \frac{1}{2} R_{ai})(1 - \bar{U}_p) + \frac{\int_0^{H_b} u_a^2 dz}{2H_b R_{ai} u_{\text{atm}}^2} \quad (23)$$

(三) 算例分析与讨论

下面分别对3个算例进行分析与讨论。有关土层参数见表1。孔隙水渗透系数 k_w 、孔隙气渗透系数 k_a 其表达式分别为^[12]

$$k_w = k_{ws} \left(\frac{S - S_r}{1 - S_r} \right)^{D_1} \quad (24)$$

$$k_a = k_{as} \left(\frac{S_a - S}{S_a - S_r} \right)^{D_2} \quad (25)$$

式中 S_r , S_a 为两个特征饱和度; D_1 , D_2 为常数。

表2给出了3个算例的土层在外加压力 $\Delta\sigma$ 瞬时作用后的有关变量(饱和度 S 、孔隙率 n 、孔隙水压 u_w 、孔隙气压 u_a 等)的计算值。由计算结果表明: 土层受瞬时外加压力作用后所产生的超孔隙压力 u_{ai} , 不仅与外加压力的大小有关, 而且还与土骨架压缩系数及初始饱和度等有关。

表1

土 层 参 数

算例	H_b (m)	m_i^s (kPa ⁻¹)	R_s	k_{ws} (m/s)	k_{as} (m/s)	S_0 (%)	n_0 (%)	u_{w0} (kPa)	u_{a0} (kPa)	D_1	D_2	S_r (%)	S_a (%)
1	0.2	1.45×10^{-4}	0.5	6×10^{-7}	3×10^{-5}	41	50	-129.8	0	4.0	4.0	15	100
2	2.0	1.45×10^{-4}	0.5	5×10^{-7}	2.77×10^{-5}	50	50	-42.5	0	4.0	2.5	42	100
3	2.0	2.1×10^{-4}	0.5	6×10^{-7}	3×10^{-5}	50	50	-42.5	0	8.0	2.5	42	100

表2

瞬时加压 $\Delta\sigma$ 后, 土层有关的变量值

算例	$\Delta\sigma$ (kPa)	S_i (%)	n_i (%)	u_{wi} (kPa)	u_{ai} (kPa)	R_{ai}	δ_i (mm)	k_{wi} (m/s)	k_{ai} (m/s)	P_{ci} (kPa)
1	690	44.95	45.61	-38.42	17.44	0.172	8.78	9.25×10^{-9}	5.28×10^{-6}	55.86
2	690	56.59	44.17	9.09	30.01	0.296	116.55	2.00×10^{-9}	1.34×10^{-5}	20.92
3	1380	72.69	34.39	155.88	160.42	1.584	312.2	3.69×10^{-9}	4.56×10^{-6}	4.54

图3是例1中土层各点不同时刻(t)的固结度。由图可见, $R_a=0.5$ 的固结度线介于 $R_a=0.0$, 1.0两者之间。可以肯定精确解也介于这两者之间。因此, 就 R_{ai} 较小的情况, 取 $R_a=0.5$ 已足够精确了。另外, 孔隙气压的消散相当迅速, 这与一般试验规律是吻合的。

图4(a), (b)分别为例2、例3土层各点不同时刻(t)的固结度简化解析解与数值解的比较曲线。由图可见, 简化解析解与数值解吻合得相当好, 两者吻合程度有两个特点: ①固结初期较后期好; ② R_{ai} 值小的时候较大的时候好。

表3给出了例2、例3在不同时刻(t)的土层中部的有关变量值, 由表可见, 补充假设(a)和(b)基本符合实际情况, 可见文中提出的简化解析解是合理的、可行的。

图5是例3的土层表面沉降时间过程线。由图可见, 本文的简化解析解与文献[10]的数值解相当一致, 再次说明简化解析解的合理性。非饱和土受瞬时外加压力作用的沉降很明显地以两部分组成, 即瞬时沉降(或称初始沉降)和孔隙压力(主要是气压力)消散而引起的消散固结沉降。后者与前者相比往往要小得多, 因此, 非饱和土初始沉降是一个非常重要的问题, 值得深入研究。另外, 对于非饱和粘性土其流变性有时是产生后期沉降的主要原因, 值得重

点研究。

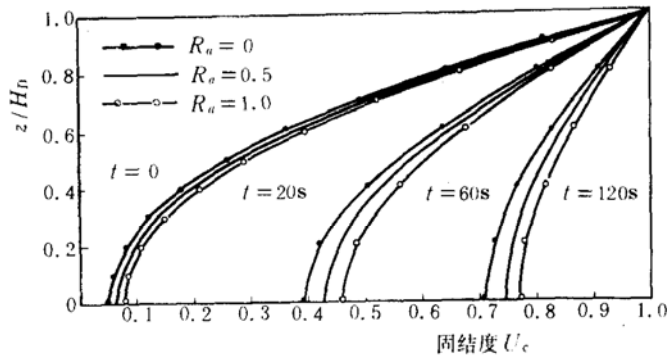


图3 土层各点不同时刻(t)的固结度

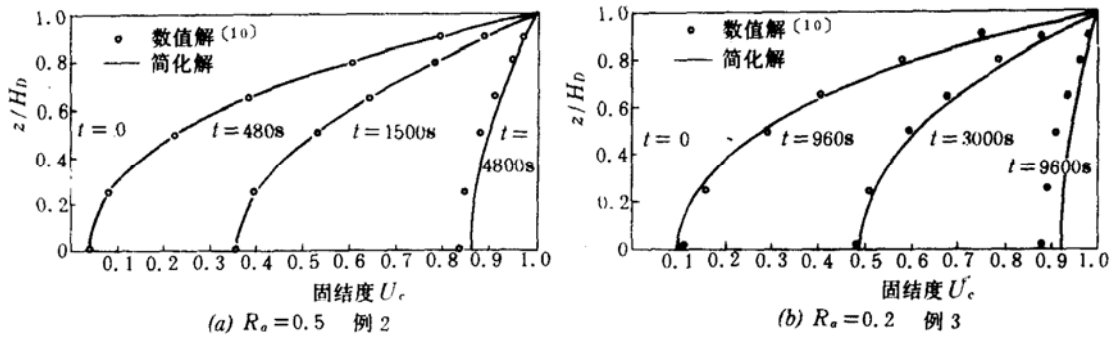


图4 土层各点固结度简化解与数值解之比较

表3

固结过程中土层中部不同时刻有关变量值

算例	t (s)	U_c (%)	S (%)	n (%)	$\frac{S-S_t}{S_t-S_0}$ (%)	$\frac{n-n_t}{n_t-n_0}$ (%)	k_w (m/s)	k_a (m/s)	P_c (kPa)
2	1500	58.39	56.78	44.03	2.88	2.40	2.11×10^{-9}	1.33×10^{-5}	20.54
	4800	92.23	56.88	43.94	4.40	3.95	2.17×10^{-9}	1.32×10^{-5}	20.33
3	3000	65.60	75.39	33.16	11.90	7.88	7.24×10^{-9}	3.52×10^{-6}	3.524
	9600	94.91	76.91	32.50	18.60	12.11	10.34×10^{-9}	3.00×10^{-6}	3.057

当孔隙气相处于内部连通时, 孔隙气渗透系数迅速减小, 式(19)中 R_{ai} 又较大, 从而导致简化解析解误差增大。但作为近似估算法, 当孔隙气处于内部连通时, 上述简化计算仍有

一定参考价值。

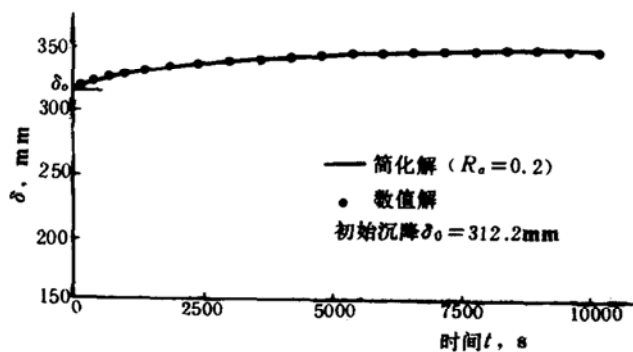


图5 土层表面沉降时间过程线

四、结 语

1. 非饱和土气相形态与其固结有着密切的关系, 其孔隙水和孔隙气的渗流运动均可以用达西定律描述。文中导出的一维固结方程组以吸力状态函数代替 Fredlund 的孔隙水相体应变本构方程^[3,13], 从而使求解固结方程组所必备参数更容易由试验确定。

2. 非饱和土孔隙气压力的消散有其自身的规律, 不能简单套用太沙基固结理论的结果。

3. 通过分析论证, 文中的简化计算模型合理、可行。为使非饱和土固结理论达到实用目的, 今后需要加强以下几方面的研究工作: ①孔隙流体的渗透性研究; ②土体吸力状态及吸力与土体力学性能的关系研究; ③土骨架本构理论研究; ④试验技术与方法研究; ⑤多维数值模型的开发与验证; ⑥工程应用研究。

感谢清华大学水利系农田水利教研组为本文提供了吸力试验资料。

参 考 文 献

- [1] Scott, R. F., Principles of Soil Mechanics, Addison-Wesley Pub. Co., Inc., Mass., U. S. A, 1963, pp. 62-78, 177—184.
- [2] Barden, L., Consolidation of Compacted and Unsaturated Clays, Geotechnique, Vol. 15, No. 3, 1965, pp. 267-286.
- [3] Fredlund, D. G. and Hasan, J. U., One Dimensional Consolidation Theory: Unsaturated Soils, Canadian Geotechnical Journal, Vol. 16, No. 3, 1979, pp. 521—531.
- [4] Lloret, A. and Alonso, E. E., Consolidation of Unsaturated Soils Including Swelling and Collapse Behavior, Geotechnique, Vol. 30, No. 4, 1980, pp. 449—477.
- [5] 俞培基、陈愈炯, 非饱和土的水、气形态及其力学性质的关系, 水利学报, No. 1, 1965, pp. 16—23.
- [6] 包承纲, 非饱和压实土的气相形态及孔隙压力消散问题, 第三届全国土力学和基础工程会议论文选集, 1979, pp. 129—135.
- [7] 李雷, 击实土压缩特性的试验研究, 水利水运科学研究, No. 3, 1986, pp. 59—70.
- [8] Dullien, F. A. L., Porous Media: Fluid Transport and Pore Structure, Academic Press, New York,

1979, pp. 200–209.

- [9] Hasan, J. U. and Fredlund, D. G. , Pore Pressure Parameter for Unsaturated Soils, Canadian Geotechnical Journal, Vol. 17, No. 3, 1980, pp. 395–404.
- [10] 杨代泉、沈珠江, 非饱和土一维广义固结的数值计算, 水利水运科学研究, No. 4, 1991.
- [11] Yoshimi, Y. and Osterberg, J. O. , Compression of Partially Saturated Cohesive Soils, Proc. ASCE, Vol. 89, SM4, 1963, p. 1
- [12] Fredlund, D. G. and Dakshanamurthy, V. , Transient Flow Process in Unsaturated Soils under Flux Boundary Conditions, Proc. of the 4th International Conference on Numerical Methods in Geomechanics, Edmonton, Canada, 1982, p. 311.
- [13] Fredlund, D. G. , Consolidation of Unsaturated Porous Media, Proc. of the NATO Advanced Study Institute on Mechanics of Fluids in Porous Media, Newark, Delaware, U. S. A, 1982, pp. 525–578.