

非饱和土受荷后的单向初期变形和固结变形

凌 华¹ 殷宗泽¹ 蔡正银²

(1. 河海大学岩土工程研究所, 江苏 南京 210098 2. 南京水利科学研究院岩土工程研究所, 江苏 南京 210024)

摘要: 为建立一维非饱和土固结简化计算方法, 首先将非饱和土的固结过程分为初期压密、气压消散和水压消散 3 个阶段并假定初期压密和气压消散这 2 个过程是瞬时完成的, 然后再单独考虑水压的消散过程. 实例模拟结果表明, 简化方法能基本反映饱和度不太高的非饱和土的固结过程, 饱和度和超过 85% 时, 气压消散存在一个较长的历时过程, 简化计算方法不宜采用.

关键词: 非饱和土; 一维问题; 固结; 变形

中图分类号: TU44 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-198X(2007)01-0047-04

非饱和土的固结问题要比饱和土复杂得多. 在建立非饱和土固结方程时, 若同时考虑孔隙气压和水压消散^[1-4], 则所建立的方程较为复杂, 参数也较多, 难以应用于工程实际. 为此, 一些学者提出了固结计算的简化方法. 这些方法大体上可分为 3 类: (a) 先将土体孔隙中的气和水看成统一的混合流体再考虑混合流体孔压消散的简化方法^[5-8]. 这种方法相对比较简单, 要确定的参数也较少, 主要适用于高饱和度的情况. (b) 主要考虑气压消散的简化方法, 如杨代泉方法^[9]. (c) 主要考虑水压消散的简化方法, 如沈珠江方法^[10-11]. 该法引入的参数排气率, 可以在一定程度上反映气压的消散过程.

由于在很多情况下超孔隙气压力的消散几乎是瞬时完成的^[12], 为了简化非饱和土一维固结计算, 本文将非饱和土的固结过程分为初期压密、气压消散和水压消散 3 个阶段并假定初期压密和气压消散这 2 个过程是瞬时完成的, 同时通过算例验证了该假定的合理性.

1 初期压密变形

假定初期压密过程是瞬时完成的, 水 and 气均未排出土体. 该阶段荷载由土骨架、水 and 气共同分担, 孔隙气在气压力作用下产生的压缩量等于土体的体积变化, 即孔隙比增量 Δe_1 . 初期如何分担荷载, 产生多大变形, 需通过计算来确定. 初期压密是土体变形的开始, 其计算结果也是固结计算的基础.

一维固结问题共有 5 个变量, 即土骨架应力 σ' 、水压力 u_w 、气压力 u_a 、孔隙比的增量 Δe 和饱和度的增量 ΔS_r , 它们可通过下列 5 个方程来求解.

a. 由毕肖普的非饱和土有效应力公式^[13]得

$$\Delta \sigma = \Delta \sigma' + \Delta u_a - \chi \Delta u_s \quad (1)$$

式中: χ ——有效应力系数, 可用经验公式^[14] $\chi = S_r(0.4S_r + 0.6)$ 进行计算; u_s ——吸力 $\Delta u_s = \Delta u_a - \Delta u_w$.

b. 由压缩曲线可得

$$\Delta e = -a_v \Delta \sigma' \quad (2)$$

式中 a_v 为压缩系数.

c. 由水分特征关系^[3]可得

$$\Delta u_s = -\frac{u_{sb}}{\lambda S_e^{1+\frac{1}{\lambda}}} \frac{\Delta S_r}{1 - S_l} \quad (3)$$

$$S_e = (S_r - S_l)(1 - S_l)$$

式中: u_{sb} ——土的进气值; S_e ——有效饱和度; S_l ——剩余饱和度; λ ——孔隙尺寸分布指标.

d. 此阶段水未排出土体,由含水率不变的条件可得 $S_r e = S_{r0} e_0$, 所以

$$\Delta S_r = -S_r \Delta e / e \quad (4)$$

e. 由气体的波以耳定律可得

$$\Delta u_a = (u_{a0} + p_a) \frac{(1 - S_{r0})e_0}{(1 - S_r)e} \left[\frac{\Delta S_r}{(1 - S_r)} - \frac{\Delta e}{e} \right] \quad (5)$$

式中: p_a ——大气压力; $(1 - S_{r0})e_0$ ——初始状态下孔隙气的体积(土体体积为 $1 + e_0$); $(1 - S_r)e$ ——初期压密后孔隙气的体积。

联立式(1)~(5)可得到初期压密后的各压力、孔隙比和饱和度表达式。

2 气压消散变形

由于饱和度不太高的非饱和土的气压消散非常迅速,水压消散较慢,为了简化计算,假定气压消散过程是瞬时完成的。在此阶段,气压转化为有效应力,土体产生相应的变形。由于这种情况是瞬时发生的,水未排出土体,孔隙水压力也未发生变化。因此,气压增量为 $\Delta u_{a2} = -\Delta u_{a1}$, 水压增量为 $\Delta u_{w2} = 0$, 有效应力的增量为 $\Delta \sigma'_2 = (1 - \chi) \Delta u_{a1}$, 产生的土体变形为 $\Delta e_2 = -a_v (1 - \chi) \Delta u_{a1}$, 饱和度的增量为 $\Delta S_{r2} = -S_{r1} e_1 \Delta e_2 / e_2^2$, 相应的吸力增量为 $\Delta u_{s2} = -\Delta u_{a1}$ 。

3 水压消散变形

该阶段气压已消散完毕,孔隙中仅有水的流动,可以只考虑水压的消散。这样可使两相流问题变成单相流问题,大大简化固结计算。因为该阶段只有水排出土体,所以单位土体的体积变化量等于土体中流出的水量。因此,连续性方程可写为

$$\frac{1}{1 + e_0} \frac{\partial e}{\partial t} = \frac{k_w}{\rho_w g} \frac{\partial^2 u_w}{\partial z^2} + \frac{1}{\rho_w g} \frac{\partial u_w}{\partial z} \frac{\partial k_w}{\partial z} \quad (6)$$

$$k_w = k_s S_e^\delta \quad \delta = (2 + 3\lambda) / \lambda$$

式中: k_w ——非饱和土的渗透系数; δ ——经验常数; k_s ——饱和土孔隙水渗透系数; ρ_w ——水的密度; g ——重力加速度。

若总应力和气压不变,则由有效应力公式可得 $\Delta \sigma' = -\chi \Delta u_w$ 。该式表示骨架应力增量是由水压消散引起的。因此,相应的体积压缩为

$$\frac{\partial e}{\partial t} = -a_v \frac{\partial \sigma'}{\partial t} = a_v \chi \frac{\partial u_w}{\partial t} \quad (7)$$

将式(7)代入式(6)得

$$\frac{\partial u_w}{\partial t} = \frac{(1 + e_0)k_w}{\rho_w g a_v \chi} \left(\frac{\partial^2 u_w}{\partial z^2} + \frac{1}{k_w} \frac{\partial u_w}{\partial z} \frac{\partial k_w}{\partial z} \right) \quad (8)$$

假定渗透系数的变化可以忽略,式(8)的差分格式为

$$u_{w,i,t+\Delta t} = u_{w,i,t} + \frac{(1 + e_0)k_w \Delta t}{\rho_w g a_v \chi \Delta z^2} (u_{w,i+1} - 2u_{w,i} + u_{w,i-1}) \quad (9)$$

由式(9)可解得水压力。

在这个阶段,土体的孔隙比增量为 $\Delta e_3 = a_v \chi \Delta u_w$, 饱和度增量为 $\Delta S_{r3} = \frac{(1 - S_{r2}) \Delta e_3}{e_2 + \Delta e_3}$, 吸力增量为 $\Delta u_{s3} = -\Delta u_{w3}$ 。

由于气压已瞬时消散完毕,水压消散这一阶段的吸力 $u_s = -u_w$ 。由此式可知,水压大于0时吸力就小于0。这不符合实际情况。对此,可做如下近似处理: $u_w > 0$ 时吸力取为0。由于在气压消散和水压消散这2个阶段计算公式的推导过程中未将吸力作为控制变量,这种处理方法对本文计算方法几乎没有影响。此外, $u_w > 0$ 时水的渗透系数仍采用非饱和土的渗透系数,因为土中实际上还有气,饱和度并不为1.0。应当指出,土是否饱和和决定于饱和度是否接近于1.0,用压力是大于0还是小于0来作为土是否饱和的判别标准是不严格的。

由气压消散和水压消散阶段公式的推导过程可知,固结过程吸力与饱和度的关系与水分特征曲线不符.水分特征关系是在吸力与饱和度(或含水量)达到稳定状态的情况下得到的,而吸力与饱和度在固结过程中并不稳定,故不宜将水分特征关系列入固结计算的控制方程中. Rahardjo^[12]指出,在很多情况下,孔隙气压力的消散几乎是瞬时完成的,而水压力的消散是比较慢的.这说明吸力变化是很快的.由水分特征关系可知,饱和度和含水率也会迅速发生变化,这显然与实际情况不符.

4 算例分析

为了验证本文方法的合理性,用文献[3]的试验结果进行验证计算.该试验^[3]试样加荷后吸力控制不变,试验前后试样的各应力如表 1 所示.试样的直径为 10.006 cm、高度为 11.815 cm、饱和度为 78.87%、含水率为 34.32%、干密度为 1.3185 g/cm³,孔隙水的渗透系数为 1.0 × 10⁻¹⁰ m/s.

假定试样底部不排气、不排水,顶部排气、排水, $\lambda = 2.0$, $S_1 = 15\%$,则由水分特征曲线的性质可知 $u_{sb} = 43.86$ kPa.此外,由所给的体积变化系数可推得压缩系数 $a_v = 2.42 \times 10^{-4}$ (kPa)⁻¹.初期压密和气压消散这 2 个阶段有关参数的计算结果见表 2,其中初始状态的有效应力由式(1)求得.水压消散阶段有效应力、水压力和土体孔隙比分布随时间的变化如图 1~图 3 所示.图中 z 是位置高度, h 是试样高度.

表 1 试验前后的应力

表 2 水压消散前计算结果

Table 1 Stresses before and after test kPa				Table 2 Calculated result before water pressure dissipation						
应力	σ	u_w	u_a	状 态	e	$S_r/\%$	u_s/kPa	u_w/kPa	u_a/kPa	σ'/kPa
试验前	358.7	163.8	214.4	初始状态	1.0696	78.87	50.3	163.8	214.1	187.9
试验后	560.9	164.4	215.6	初期压密	1.0364	81.40	49.6	229.7	279.3	325.2
增 量	202.2	0.6	1.2	气压消散	1.0345	81.55		229.7	214.1	333.1

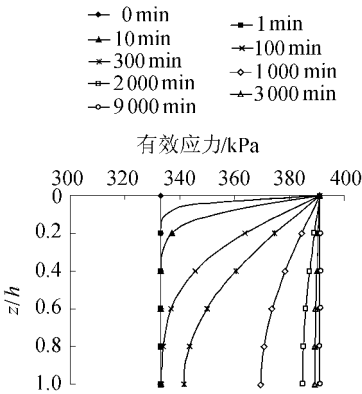


图 1 有效应力分布随时间的变化
Fig.1 Variation of effective stress distribution with time

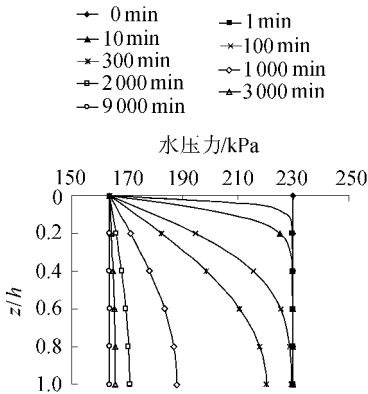


图 2 孔隙水压力分布随时间的变化
Fig.2 Variation of pore water pressure distribution with time

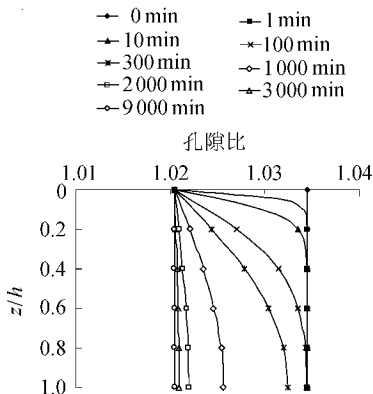


图 3 孔隙比分布随时间的变化
Fig.3 Variation of void ratio distribution with time

计算和试验的试样体积变形与时间的关系如图 4 所示.由于假定初期压密和气压消散是瞬时完成的,初始状态的计算结果要比试验结果大,但随着时间的推移,二者差别越来越小.这说明本文简化计算方法基本上适用于饱和度不太高的非饱和土的固结计算.

5 结 语

本文首先假定非饱和土气压消散是瞬时完成的,然后独立考虑水压的消散,最后建立了非饱和土的固结简化计算方法.验证计算结果表明,本文固结简化计算方法特别适用于气压消散比水压消散要快得多的饱和度不太高的非饱和土的固结计算.

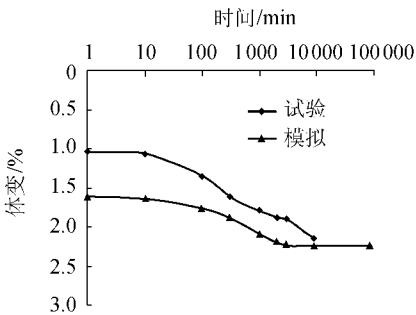


图 4 体变与时间的关系
Fig.4 Relationship between volumetric deformation and time

参考文献:

- [1] BARDEN L. Consolidation of compacted and unsaturated clay[J]. *Geotechnique* ,1965 ,15(3) 267-286.
- [2] FREDLUND D G ,HASAN J U. One dimensional consolidation theory : unsaturated soils[J]. *Canadian Geotechnical Journal* ,1979 ,16(3) :521-531.
- [3] 弗雷德隆德 D G ,拉哈尔佐 H. 非饱和土土力学[M]. 陈仲颐,张在明,陈愈炯,等,译. 北京:中国建筑工业出版社,1997:126-146.
- [4] 陈正汉,谢定义,刘祖典. 非饱和土固结的混合物理理论 I[J]. *应用数学和力学* ,1993 ,14(2) :127-137.
- [5] YIN Zong-ze ,SUN Chang-long ,MIAO Lin-chang. Consolidation of unsaturated expansive soils[C]//Proc 2nd International Conference on Unsaturated Soils. Beijing: International Academic Publishers ,1998.
- [6] CHANG C S ,DUNCAN J M. Consolidation analysis for partly saturated clay by using an elastic-plastic effective stress-sating mode[J]. *International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics* ,1983 ,7(1) 39-55.
- [7] 张庆华,丁学福,孙长龙. 非饱和土固结一维半解析解[J]. *水道港口* ,1996(3) 33-41.
- [8] 魏海云,詹良通,陈云敏. 高饱和度非饱和土的压缩和固结特性及其运用[J]. *岩土工程学报* ,2006 ,28(2) 264-269.
- [9] 杨代泉,沈珠江. 非饱和土的一维固结简化计算[J]. *岩土工程学报* ,1991 ,13(5) 70-78.
- [10] SHEN Zhu-jiang. Reduced suction and simplified consolidation theory for unsaturated soil[C]//Proc First Int Conf Unsaturated Soils. Rotterdam: Balkema A A ,1995 :1533-1540.
- [11] 沈珠江. 非饱和土简化固结理论及其运用[J]. *水利水运工程学报* ,2003(4) 1-6.
- [12] RAHARDJO H. The study of undrained and drained behavior of unsaturated soils[D]. Canada: University of Saskatchewan ,1990.
- [13] BISHOP A W ,ALPAN I ,BLIGHT G E ,et al. Factors controlling the shear-strength of partly saturated cohesive soils[C]//Proc ASCE Conference on Shear of Cohesive Soils. Colorado: University of Colorado ,1960 503-532.
- [14] AITCHISON G D. Relationship of moisture and effective stress functions in unsaturated soils[C]//Proc Pore Pressure and Suction in Soils Conf. London: Butterworths ,1961 47-52.

One-dimensional deformation at initial stage and consolidation deformation of unsaturated soil under loading

LING Hua¹ , YIN Zong-ze¹ , CAI Zheng-yin²

(1. *Geotechnical Research Institute of Hohai University , Nanjing 210098 , China ;*

2. Geotechnical Engineering Department , Nanjing Hydraulic Research Institute , Nanjing 210024 , China)

Abstract : The study was performed to establish a simplified method for calculation of one-dimensional consolidation deformation of unsaturated soil. At first , the consolidation process of unsaturated soil was divided into three stages , i. e. compaction at initial stage , air pressure dissipation , and water pressure dissipation , and it was assumed that the compaction at initial stage and air pressure dissipation were completed instantaneously. Then , the process of water pressure dissipation was studied separately. Case study shows that the simplified method can reflect the consolidation process of unsaturated soil with relatively low degree of saturation , and that it was not suitable for reflecting the consolidation process of unsaturated soil at the degree of saturation over 85% due to the fact that the air pressure dissipation lasts a long period of time.

Key words : unsaturated soil ; one-dimensional problem ; consolidation ; deformation