

非饱和土等效固结变形特性与一维固结变形分析方法

邵生俊, 王 婷, 于清高

(1. 西安理工大学岩土工程研究所, 陕西 西安 710048; 2. 陕西省黄土力学与工程重点实验室, 陕西 西安 710048)

摘 要: 非饱和土的固结变形特性及分析方法一直是土力学的研究热点。由于非饱和土是一种三相的多孔松散介质, 三相之间不仅具有力学效应复杂多变的收缩膜, 而且还存在气、固与固、液之间的电化作用物理作用以及它们物理性态变化的影响, 因此, 仅依据吸力特征量来反映固、液、气及收缩膜之间的联系对于认识非饱和土力学特性存在很大困难。从非饱和土客观存在的固结变形变化以及固结变形稳定时固、液、气共同构成的等效骨架承担压缩应力出发, 提出将复杂多变的非饱和土固、液、气三相及收缩膜和各相的物理化学表观作用等效为骨架相和流体相, 通过压缩、固结试验揭示了非饱和土固结过程的等效骨架相应力和等效流体相压力的变化规律、瞬时压缩变形特性, 以及等效固结系数, 将复杂的非饱和土固结问题简化为两相耦合作用问题, 建立了一种实用的非饱和土一维等效固结分析方法。

关键词: 非饱和土固结; 等效骨架相; 等效流体相; 等效固结物理模型; 等效固结分析方法

中图分类号: TU43

文献标识码: A

文章编号: 1000-4548(2009)07-1037-09

作者简介: 邵生俊(1964-), 男, 甘肃武威人, 教授, 博士生导师, 从事土动力学与黄土力学研究。E-mail: sjshao@xaut.edu.cn。

Equivalent consolidation deformation properties and one-dimensional analysis method of unsaturated soils

SHAO Sheng-jun, WANG Ting, YU Qing-gao

(1. Institute of Geotechnical Engineering, Xi'an University of Technology, Xi'an 710048, China; 2. Shaanxi Key Laboratory of Loess Mechanics and Engineering, Xi'an 710048, China)

Abstract: The consolidation deformation characteristics and analysis methods of unsaturated soil are the key issues in the field of soil mechanics. The unsaturated soil is a kind of three-phase porous medium. There is not only the interaction among the solid phase, liquid phase and gaseous phase, the mechanical effect from complicated shrinkable film but also the morphological and chemical change in soluble mineral property. Therefore, it is not enough to only establish an association among the solid phase, liquid phase, gaseous phase and shrinkable film by suction characteristic quantity in the study on mechanical behaviors of the unsaturated soil. The solid phase, liquid phase, gaseous phase, shrinkable film and mineral components behavior apparent effect are considered as the equivalent fabric phase and fluid phase. The equivalent fabric phase has both the stress resistance and the shear performance. The equivalent fluid phase only has the stress resistance. It can reduce those relative to the skeleton phase. Complex multiphase of the unsaturated soil is the equivalent fabric phase and fluid phase. So the complex consolidation of unsaturated soil can be solved by two-phase analysis method, which considers the transient compression deformation, the initial equivalent fabric stress and the movement of equivalent fluid phase. This paper sets up one-dimensional equivalent consolidation analysis method.

Key words: consolidation of unsaturated soil; equivalent fabric phase; equivalent fluid phase; equivalent consolidation physical model; equivalent consolidation analysis method

0 引 言

非饱和土的固结问题一直是土力学研究的热点。以往, 人们抓住非饱和土的吸力特征, 基于作用于土骨架的净应力与基质吸力或有效应力, 分别从土骨架体积变形与水、气运动体变量一致的条件, 或者三相

的连续条件出发, 揭示非饱和土的固结特性, 建立了相应的非饱和土固结变形分析方法。前者代表性的方

基金项目: 国家自然科学基金项目(50779054)

收稿日期: 2008-05-04

法由Fredlund等^[1-2]提出,后者代表性的方法由陈正汉等^[3-4]提出。但是,非饱和土力学的特殊性不仅在于因气相存在而形成的收缩膜效应,而且还存在矿物成分与液相之间、气相与液相之间和流体与骨架之间复杂的电化学和物理作用^[5]。非饱和土中固、液、气三相及收缩膜之间的相互作用既与它们的物质特性有关,还与它们共同形成的结构性有关,任何一方面的变化均会导致土的性状发生变化^[6-8]。这样一种复杂介质结构的单元体受到附加应力作用时,一方面固、液、气三相及收缩膜构成的结构发生变化,最终抵抗附加作用应力;另一方面伴随着结构的体缩,存在液、气相在结构孔隙中的运动。前者不仅包含土粒构架,而且包含了液固间的电化学加固作用、气液固之间的收缩膜加固作用等,它们构成了非饱和土的骨架结构系。结构系中各种要素的调整与变化在于抵抗附加应力作用;后者是指结构系体缩过程中液、气相在结构系孔隙中运动,以便适应土骨架结构系中各种要素的调整变化。因此,非饱和土的固结过程实际上是土骨架结构系中各要素调整变化的过程,也是适应这种变化液、气相在结构孔隙中运动的过程。

众所周知,饱和土的固结是土骨架体缩,孔隙水渗透排出的过程;也是土骨架传递的应力(有效应力)增大,孔隙水压力消散的结果。与此相似,非饱和土的固结是土骨架结构系体缩,结构系孔隙中液、气相运动的过程;也是土骨架结构系承担应力增长,液、气相运动驱动压力消散的过程^[9]。由此可见,具有复杂多变的固、液、气三相及收缩膜的非饱和土可以视为土骨架结构系和压力梯度驱动下结构系内运动的流体,前者依据它们的表现作用视为等效骨架相,后者依据它们的表现行为视为等效流体相。等效骨架相既能抵抗压力作用,又能抵抗剪切作用;等效流体相只能抗压,它是收缩膜两侧相对于等效骨架相具有流动特性的孔隙水和孔隙气。这样,将复杂多相的非饱和土就简化为等效骨架相和等效流体相,非饱和土固结问题也就简化为两相耦合作用问题。

基于上述认识,非饱和土的等效骨架和等效流体共同承担附加作用应力。固结过程不同时刻作用于等效骨架相的应力和等效流体相的压力(一个中和应力)不同;等效流体相在压力梯度作用下的运动,其压力逐渐消散。随着等效骨架相应应力逐渐增长,其压缩变形也逐渐发展;固结完成时,等效骨架相承担了全部附加应力。因此,非饱和土的压缩应力应变关系就是等效骨架相应应力与变形的关系,依据固结过程不同时刻的压缩变形就可以确定相应时刻等效骨架相的应力,总的附加应力中扣除等效骨架相应应力后就可得到等效流体相压力的发展变化规律。本文通过一维侧限

压缩条件下非饱和土固结试验揭示了固结过程中等效骨架相应力的变化规律,为建立以等效骨架相应力为基础的单元应力状态变量,以及基于等效流体运动规律和连续方程的固结分析原理提供了基础。

1 等效骨架相与等效流体相应力

1.1 测试方法

通过非饱和重塑黄土(土粒比重2.7,液限30.6%,塑限18.7%)压缩试验及固结试验能够测试得到固结变形过程曲线(图1)及压缩变形曲线(图2)。

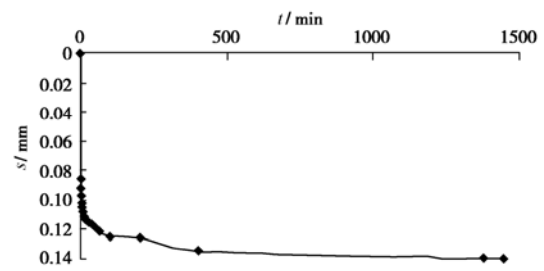


图1 固结变形曲线

Fig. 1 Relationship between compression deformation and consolidation time

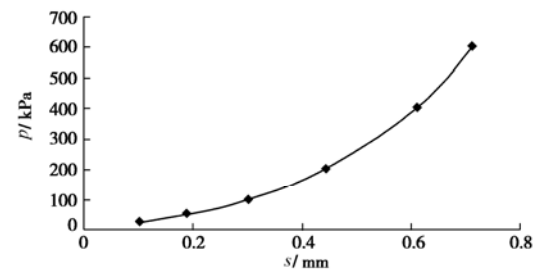


图2 压缩变形的曲线

Fig. 2 Relationship between compression deformation and pressure

压缩变形曲线上不同应变状态对应的压缩应力实际上就是非饱和土等效骨架相承受的应力。在某级附加应力作用下,依据固结过程不同时刻的变形,再加上该级之前各级附加应力作用固结完成时累积的变形量,通过压缩曲线就可以得到对应时刻的等效骨架相应力。等效固结相应力中扣除该级荷载之前完成固结的累积压缩应力,也就是该级附加应力作用下不同时刻等效骨架相应力的增量,与该级附加应力比较也就得到了不同时刻的等效流体相压力。某一附加应力作用下非饱和土固结过程的等效骨架相应力和等效流体压力的变化过程如图3所示。附加应力 σ 与等效骨架相应力 σ^* 和等效流体相压力 u^* 可表述为

$$\sigma^* + u^* = \sigma, \quad (1)$$

1.2 等效骨架相应力的变化规律

图4、5分别给出了干密度为 1.43 g/cm^3 , 1.60 g/cm^3 不同含水率非饱和土样在各级附加应力作用下等效骨

架相应力增长变化规律。表明不同初始固结应力、附加应力增量作用下, 非饱和土均有明显的等效骨架相应力增长变化过程。固结初始等效骨架相应力增长较快, 随后增长较慢; 不同含水率非饱和土的等效骨架相应力增长变化曲线均分布在一个带内, 具有一致的变化规律; 附加应力越大, 固结过程等效骨架相应力的增长幅度越大; 比较两种密度非饱和土的固结过程, 它们的等效骨架相应力的发展规律基本一致。这些变化规律说明, 在附加应力作用瞬时, 非饱和土的等效固结相即分担应力, 附加应力越大, 初始的等效骨架相应力增长越大; 附加应力越大, 作用于等效流体相的压力越大, 在给定渗径条件下, 驱动流体运动的梯

度越大, 非饱和土的固结变形增长越快, 但固结历时不会因为初始等效流体相的压力大而明显延长。

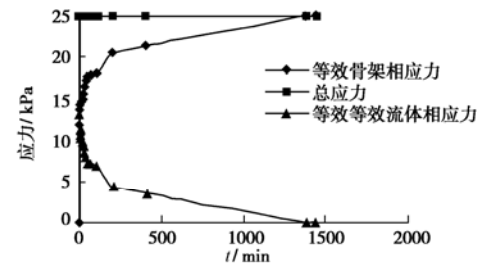


图3 等效骨架相应力及等效流动相压力的变化规律

Fig. 3 Pressure of equivalent fabric phase and equivalent fluid phase varying with consolidation time

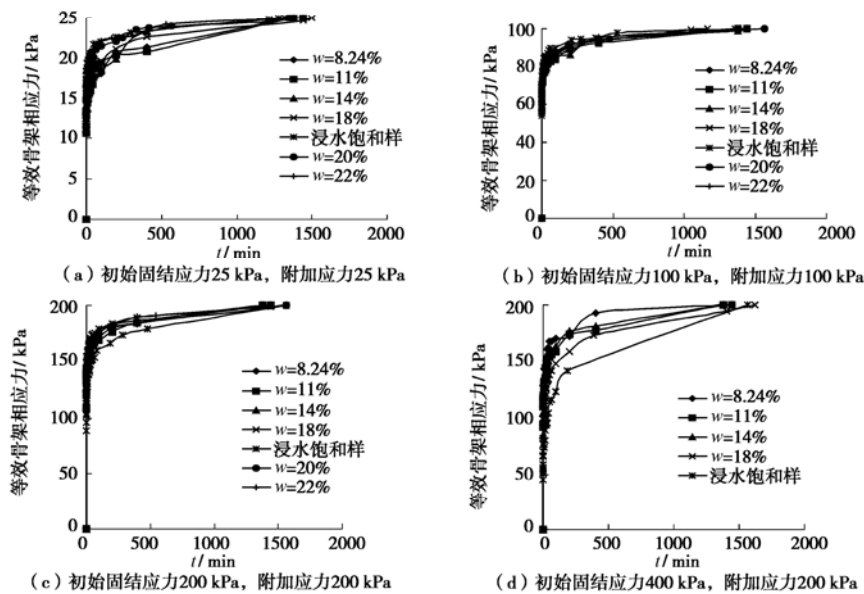


图4 各级附加应力作用下等效骨架相应力增长变化规律(干密度 1.43 g/cm^3)

Fig. 4 Pressure of equivalent fabric phase increasing with consolidation time (dry density 1.43 g/cm^3)

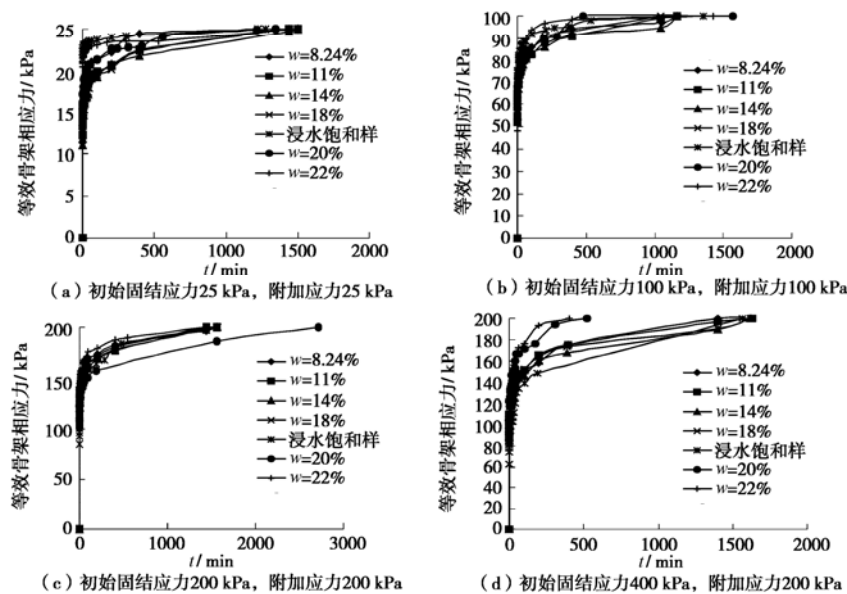


图5 各级附加应力作用下等效骨架相应力的增长变化规律(干密度 1.60 g/cm^3)

Fig. 5 Pressure of equivalent fabric phase increasing with consolidation time (dry density 1.60 g/cm^3)

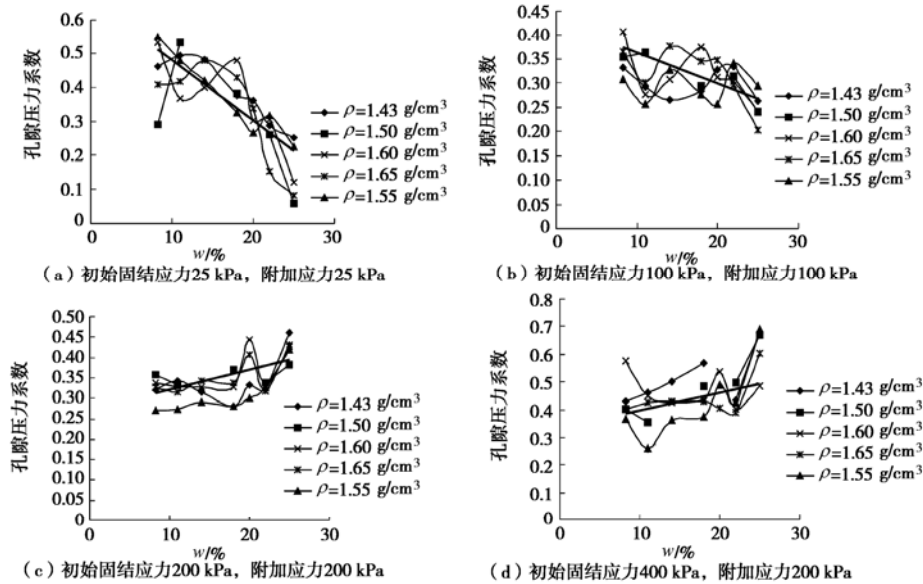


图6 孔隙压力系数与含水率的关系曲线

Fig. 6 Relationship between pressure coefficient of equivalent liquid and water content of soil

1.3 等效流体压力的变化规律

如图4, 5所示, 附加应力作用瞬时, 等效骨架相瞬间承担了部分应力, 此后随着固结时间的增长而增大, 最后趋近于附加应力。与此同时, 等效流体相必然承担了剩余部分应力。与饱和土不同, 由于非饱和土土骨架结构系孔隙中气相的压缩性, 使得等效流体相瞬间产生压缩, 等效骨架相也产生瞬间的压缩变形。当等效流体压力趋近于零时, 等效流体相就停止了相对于土骨架结构系的运动, 等效骨架相应力不再增长, 土骨架结构系处于稳定状态。但是, 土骨架结构系中的孔隙水压力和孔隙气压力并不等于零, 也不一定与附加应力作用初始的孔隙水压力和孔隙气压力一致。

将瞬时压缩时产生的等效流体压力与附加应力的比值定义为孔隙压力系数 A , 通过实验结果分析确定了不同湿度、不同密度及应力条件下的等效流体压力系数, 如图6所示。结果表明, 当初始固结应力较小时, 孔隙压力系数 A 随含水率的增加而降低; 当初始固结应力较大时, 孔隙压力系数 A 随着含水率的增加而增加; 干密度对孔隙压力系数的影响不大, 可以忽略。与等效骨架相应力的增长变化相反, 随着固结时间的增长, 等效流体压力逐渐减小, 最后趋于零。

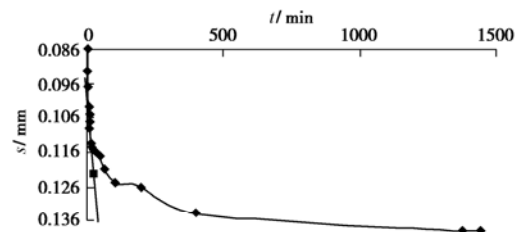
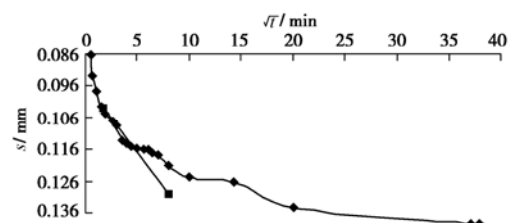
2 等效骨架相压缩变形特性

2.1 固结变形发展变化的特征

为了分析非饱和土固结变形的特点, 分别分析了 $s-t$ 、 $s-\sqrt{t}$ 、 $s-\log t$ 曲线的特点, 如图7~9所示。

图7表明, 试样在初始的瞬时压缩变形有较大发展, 压缩变形随着固结时间的增长逐渐趋缓, 在较短

时间后即呈近似线性增长的流变发展阶段, 即在 $s-t$ 坐标系内非饱和土固结变形发展不明显。图9表明, 在 $s-\log t$ 坐标内的非饱和土固结曲线, 并不像饱和土的固结曲线那样呈抛物线变化, 而是除初始变形迅速发展外, 之后几乎呈线性变化, 固结变形和流变变形的分界点并不明显。因此, 不宜采用 $s-t$ 曲线或 $s-\log t$ 曲线分析试样的固结变形阶段。图8表明, 在 $s-\sqrt{t}$ 坐标内, 固结时间经开方后, 使得固结变形段特征更加明显。

图7 非饱和土固结过程的 $s-t$ 曲线Fig.7 The $s-t$ curves in consolidation process of unsaturated soil图8 非饱和土固结过程的 $s-\sqrt{t}$ 曲线Fig. 8 The $s-\sqrt{t}$ curves in consolidation process of unsaturated soil

依据 $s-\sqrt{t}$ 曲线可以将压缩变形的整个过程划分为3段。其中, 初始段压缩变形增长很快, 末尾段压缩变形增长缓慢且呈线性变化, 中间段压缩变形逐渐增

大且趋缓。由 $s\text{-}\log t$ 曲线也可以明确地得到固结变形的起始点。

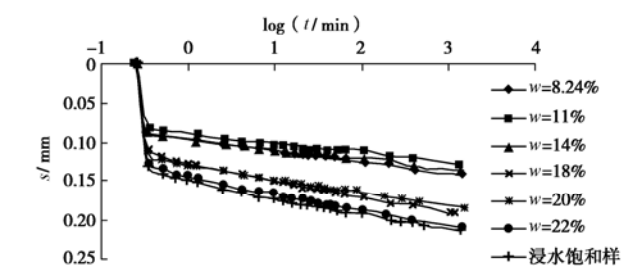


图 9 非饱和土固结过程的 $s\text{-}\log t$ 曲线

Fig. 9 The $s\text{-}\log t$ curves in consolidation process of unsaturated soil

2.2 等效骨架相压缩应力应变关系

非饱和土的压缩应力应变曲线也就是其等效骨架相压缩应力应变曲线，如图10所示。含水率低于18%时，各级附加应力作用下等效骨架相的压缩应变较小；含水率高于18%时，土的含水率高于塑限，初级附加应力作用下等效骨架相的压缩应变增长明显，此后随着各级应力依次作用，压缩应变增长趋缓。在每级附加应力作用下，等效骨架相的压缩变形均包括了瞬时压缩变形和固结压缩变形。由于瞬时压缩变形在附加应力作用的瞬间已经完成，因此，各级附加应力作用过程的压缩变形就是它们瞬时压缩变形和固结压缩变形的累计。

如果扣除每级附加应力作用下瞬时作用于等效骨架相的应力和瞬时压缩变形，则固结应力应变曲线如图11所示，它反映了非饱和土固结过程等效骨架相的固结变形特性。表明随着附加应力的依次累积作用，非饱和土的固结应力应变曲线呈单调的非线性变化。

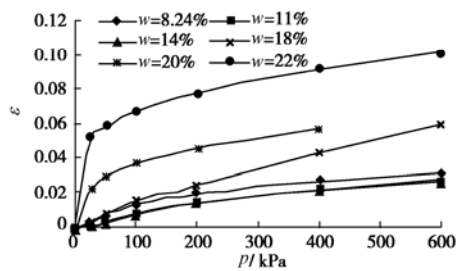


图 10 压缩应力应变曲线

Fig. 10 Relationship between compressing stress and strain

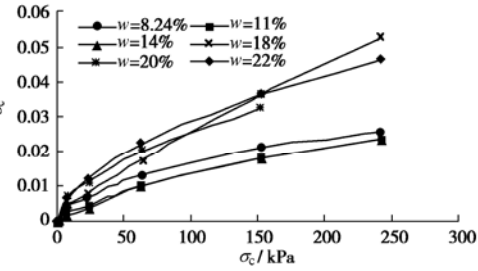


图 11 固结应力应变曲线

Fig. 11 Relationship between stress of equivalent fabric phase and consolidation strain

2.3 等效骨架相瞬时压缩变形特性

瞬时压缩变形是非饱和土等效骨架相在瞬时承受压缩应力作用下的反应，由等效土骨架相瞬时承担的压缩应力与其相应的压缩应变比来揭示分析瞬时压缩变形特性，该比值称为瞬时压缩模量，

$$E = \frac{(1-A)\sigma h}{\delta} \quad (2)$$

式中， A 为孔隙流体压力系数， σ 为附加应力， $(1-A)\sigma$ 则为瞬时变形时等效骨架相应应力， h 为试样高度， δ 为瞬时压缩变形。

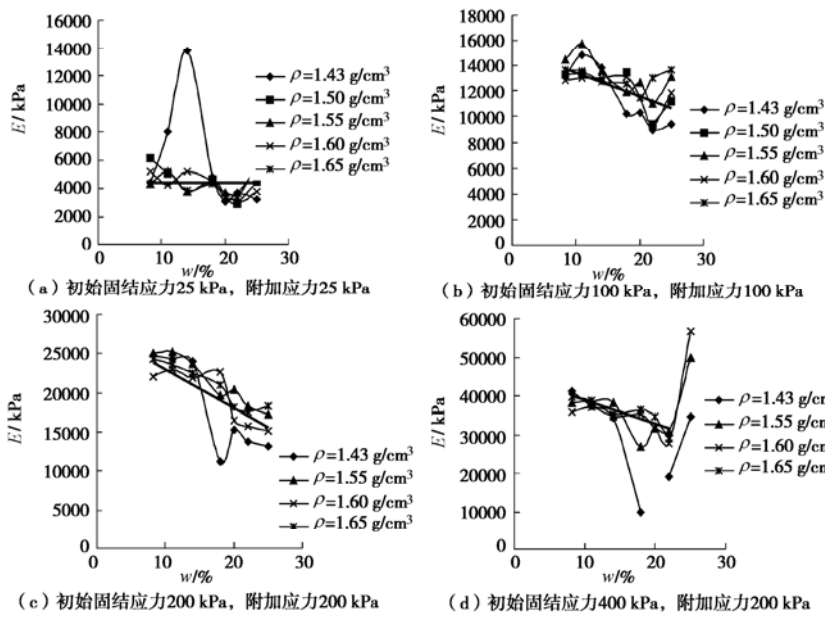


图 12 瞬时压缩模量与含水率的关系曲线

Fig. 12 Relationship between transient compression modulus and water content of unsaturated soil

依据不同密度、不同含水率非饱和土分级加载固结试验,得到了如图12所示的结果,同一应力条件下不同干密度非饱和土的瞬时压缩模量随含水率逐渐减小的变化近似地分布在一个带内,初始固结应力越大,附加应力作用下非饱和土的瞬时压缩模量越大;随着压缩应力增大,压密变形增长,瞬时压缩模量不断增大,表明初始固结应力越大,非饱和土在附加应力作用下初始的瞬时变形越小。当初始固结应力为400 kPa,附加应力为200 kPa时,非饱和土的瞬时压缩模量随含水率先是逐渐减小,但大于22%后则显著增大。

3 等效流体相渗透规律

非饱和土骨架结构孔隙内充满了可流动的气、液流体,当非饱和土被瞬时压缩之后,假定等效流体不可再被压缩,则附加应力作用下等效骨架相的体积变化量就是等效流体排出的体积变化量。依据非饱和土固结变形测试结果,通过附加应力扣除等效骨架应力确定等效流体压力,进而可以建立固结过程等效流体压力与其体变量的变化关系,如图13所示。

在初始固结应力和附加应力均为200 kPa作用时,不同含水率非饱和土的等效流体压力与等效流体相体变量呈线性变化关系,它们具有很好的相关性,表明等效流体压力是非饱和土体等效流体渗透运动的驱动力。依据等效流体压力与等效流体相体变量的变化曲线,由等效流体压力与水重度和渗径的比确定相应的等效流体梯度,分析固结变形过程等效流体压力梯度与等效流体渗透流速的关系曲线,如图14所示。表明等效流体运动随压力梯度增大而增大,呈非线性变化,且梯度小于一临界值时,等效流体渗透运动速度趋于零。

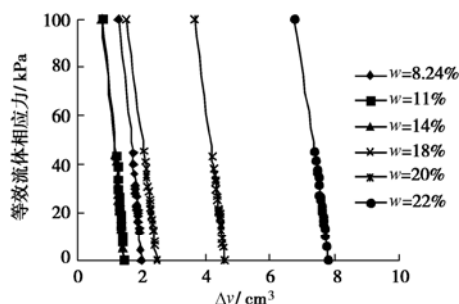


图13 等效流体相压力与其体变量变化的关系曲线

Fig. 13 Relationship between volume deformation and pressure of equivalent flow

4 非饱和土固结机理、模型与分析原理

4.1 固结变形机理分析

依据上述试验结果分析,非饱和土在附加应力作

用瞬间有明显的压缩变形,此后随着时间逐渐增长,压缩变形逐渐趋于稳定。这是因为非饱和土受到瞬间施加的外荷载作用时,土骨架承受的应力增长并超过它的局部结构屈服强度,引起土结构破坏而发生变形;同时,土中的气相被瞬时压缩或排出土骨架孔隙,压缩的气体产生和发展相应的超孔隙气压力,并将压力传递给自由流动的水,引起孔隙水压力的发展变化。

由于外加荷载必须由土骨架及其间孔隙水、孔隙气承担,且满足平衡条件,荷载作用瞬间的孔隙水压力和超孔隙气压力可被看作是固结的初始孔隙水压力和初始孔隙气压力,它们的变化产生了排水排气的驱动力。土骨架结构系孔隙中存在只能受压的由气体和液体构成的等效流体相;土颗粒骨架、胶结矿物与附着的水、气构成了既能抗剪,又能抗压的等效骨架相。等效流体相分担了部分附加荷载,从而使等效土骨架承担的荷载减小。随着排气、排水的发生,即等效流体在压力梯度驱动下逐渐排出,等效流体分担的荷载逐渐减小,等效土骨架承担的荷载增大,等效土骨架的体应变逐渐增大,土发生了固结变形;当等效流体相压力趋于零时,等效土骨架承担了全部荷载,固结变形完成。在不考虑流变的情况下,可以将非饱和土由瞬时加荷到变形稳定这个过程分解为瞬时压缩和固结变形两个阶段。

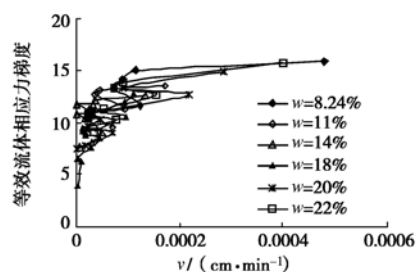


图14 等效流体相压力梯度与其流速的关系曲线

Fig. 14 Relationship between velocity of equivalent flow and its pressure grad

4.2 非饱和土等效固结物理模型

已经指出,非饱和土可简化为等效骨架相和等效流体相两相介质,其固结变形过程也就是等效两相介质耦合共同承载的变化过程。与饱和土两相介质的固结物理模型相似,可抽象提出如图15所示的物理模型。其中,弹簧代表等效骨架相,封闭气、封闭水、连通气、连通水分别代表孔隙气和孔隙水的存在方式^[8],等效流体就是这些不同存在方式的水、气按照不同比例混合构成的。固结过程水气的部分参与渗透运动(等效流体渗透),另外部分参与构成土骨架结构系。如图16所示,附加应力 σ 作用瞬时,土发生瞬时压缩变形,等效骨架相承担瞬时压缩应力 σ_1^* ;固结过程等效流体

压力 u^* 逐渐减小, 等效骨架相应力 σ^* 随时间逐渐增长; 当固结时间趋于无穷大时, 等效流体压力等于零, 等效骨架相应力等于附加应力。

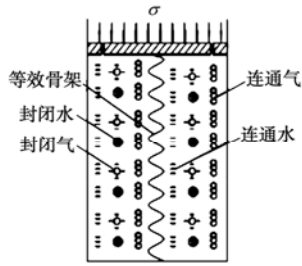


图 15 非饱和土等效固结物理模型

Fig. 15 Physical model of equivalent consolidation of unsaturated soil

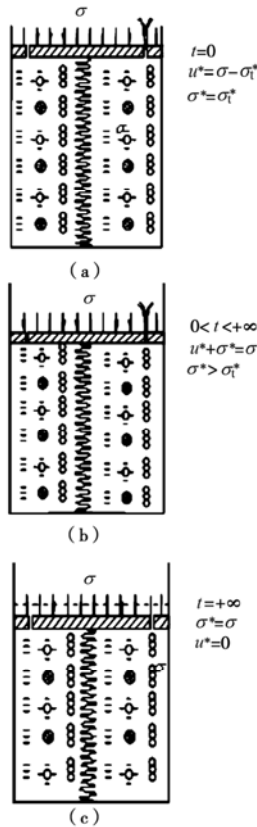


图 16 固结过程

Fig. 16 Consolidation process

4.3 一维等效固结变形分析原理

对于均质非饱和土地基, 当受到均布附加应力作用时, 首先产生瞬时压缩变形, 再有伴随等效流体相耦合运动产生的固结变形; 地基的固结服从等效流体相对于土骨架结构系运动的单向渗透固结变化。依据非饱和土的等效固结变形特性, 等效骨架相应力随等效流体相压力的消散而逐渐增长, 最终等效骨架相承担全部附加应力; 等效骨架相应力与压缩应变呈非线性关系, 等效流体渗透运动速度与压力梯度也呈非线性

性关系。假定荷载瞬时作用且完成瞬时压缩变形; 在固结变形过程中等效骨架相土粒及等效流体相介质均为不可压缩; 土等效骨架相固结应力应变服从线性关系, 压缩模量为常数; 土体中只有竖直方向的渗流与压缩; 等效流体的渗流速度与压力梯度间服从线性变化规律, 其比例系数也为常数。那么, 依据等效骨架相固结变形与等效流体相体变量一致的条件, 可以建立非饱和土等效两相介质的固结方程。即

$$C_v^* \frac{\partial^2 u^*}{\partial z^2} = \frac{\partial u^*}{\partial t}, \quad (3)$$

式中, C_v^* 为等效固结系数, z 为单向渗透方向。

初始条件 ($t=0$):

$$\left. \begin{aligned} u^* &= A\sigma, \\ \sigma^* &= (1-A)\sigma, \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

式中, A 为孔隙流体压力系数, σ 为瞬时作用的附加应力。

边界条件 ($t>0$): 渗流溢出边界 ($z=0$) 的等效流体压力为零; 非渗透边界 ($z=H$) 的压力梯度为零, 即等效流体压力沿渗流方向的变化率为零。即:

$$\left. \begin{aligned} u^* &= 0 & (z=0), \\ \frac{\partial u^*}{\partial z} &= 0 & (z=H). \end{aligned} \right\} \quad (5)$$

求解方程 (2), 可以得到非饱和土固结过程等效流体压力的解答,

$$u^*(z, t) = \sum_{m=0}^{\infty} \left(\frac{A\sigma}{M} \sin \frac{Mz}{H} \right) \exp(-M^2 T_v), \quad (6)$$

式中, $M = (2m+1)\pi/2$, $T_v = C_v^* t / H^2$ (时间因数)。

均质非饱和土地基的平均固结度为

$$U = \frac{s_t}{s_0} = 1 - \frac{8}{\pi^2} \sum_{n=0}^{\infty} \left(\frac{1}{2n+1} \right)^2 \exp \left[- \left(\frac{2n+1}{2} \pi \right)^2 T_v \right], \quad (7)$$

式中, s_t 为 t 时刻地基的固结变形, s_0 为地基最终固结变形。

5 非饱和土固结系数确定

通过以上 3 种曲线的对比分析, $s - \sqrt{t}$ 曲线能够明确区分出压缩变形随时间变化发展的不同特征段。由 $s - \sqrt{t}$ 曲线初始固结段的延长线与纵坐标轴的交点可以确定瞬时沉降变形; 由 $s - \sqrt{t}$ 曲线末端线性变化的初始点确定的变形和瞬时变形确定最终固结变形。依据实测固结变形发展过程确定固结度与时间平方根曲线与式 (7) 绘制的 $U - \sqrt{t}$ 曲线比较, 如图 17 所示, 可以确定对应的固结系数。

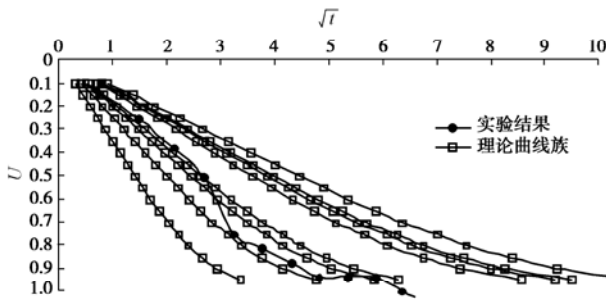


图 17 试验结果与理论曲线族比较

Fig. 17 Comparison between test and theoretical results

6 附加压缩应力作用下非饱和土压缩变形随时间变化过程计算分析

为了进一步考察非饱和土等效固结变形分析方法,进行了大试样(高14 cm,截面积78.54 cm²,含水率8.24%,干密度1.43 g/cm³)的固结实验,初始固结应力为100 kPa,附加应力为100 kPa。已经揭示,附加应力作用下,非饱和土侧限压缩变形主要包括瞬时压缩变形和固结变形两部分。瞬时压缩变形依据固结初始的等效骨架相应力增量和瞬时压缩模量来确定;固结过程的压缩变形量可由最终固结变形量与不同时刻的固结度来确定。因此,在测定瞬时压缩模量、孔隙压力系数、等效固结系数、固结变形体积压缩系数的基础上,进行瞬时压缩变形和固结变形分析就可以描述非饱和土压缩变形随时间的发展变化过程。

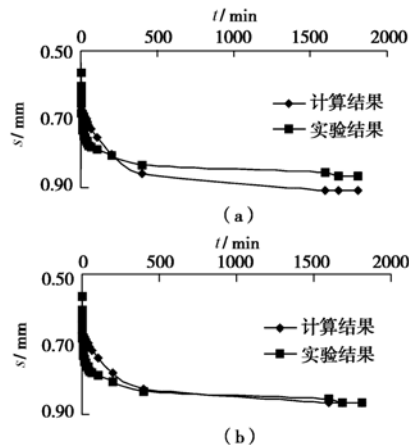


图 18 计算结果与模型试验结果的对比

Fig. 18 Comparison between model tests and calculated results

依据前述试验方法,测试得到大试样的瞬时压缩模量为13.7 MPa,孔隙压力系数 A 为0.37,体积压缩系数 m_v 为0.0191 MPa⁻¹,等效固结系数 C_v^* 为0.004976 cm²/s。那么,瞬时变形为 $\delta = (1-A)\sigma h/E = 0.643$ mm,最终固结压缩变形为 $s_0 = hm_v A \sigma = 0.2667$ mm,不同时刻的固结变形为 $s_t = s_0 U$ 。其中,固结度 U 依据式(7)计算。不同时刻的

压缩变形依据瞬时变形与固结变形之和确定。非饱和土的固结变形计算结果与测试结果如图18所示,计算结果与测试结果具有一致的变化规律,验证了非饱和土的等效固结分析方法的正确性。

7 结 论

(1) 将具有复杂物理、电化作用固、液、气相及收缩膜的非饱和土视为变形稳定时承受全部附加荷载的等效骨架相和相对于等效骨架相运动的等效流体相,提出了依据压缩、固结试验确定等效骨架相应力和等效流体压力的方法。等效骨架相应力随固结变形的发展逐渐增长,固结变形稳定时承受全部附加压缩应力;等效流体压力随固结变形的发展逐渐降低,固结变形稳定时消散为零。

(2) 非饱和土固结变形初始有显著的瞬时压缩变形,瞬时压缩变形是附加应力作用瞬时等效骨架相承受应力的结果。依据固结初始等效骨架相应力与瞬时压缩应变比定义了瞬时压缩变形模量;依据固结初始等效流体压力与附加压缩应力比定义了孔隙流体压力系数。

(3) 等效骨架相实质上包含了土粒骨架、粒间各种联结及收缩膜的共同作用,与固、液间的物理化学作用及水、气存在状态密切相关,也与土的结构性相关。随着土粒骨架的空间分布、粒间各种联结及收缩膜效应的变化,非饱和土的等效骨架相是不断变化的。等效流体充满了等效骨架相孔隙,等效流体压力梯度与流体运动速度呈线性变化规律。因此,等效骨架相与等效流体相是动态变化的。

(4) 依据等效骨架相应力及变形的变化规律和等效流体相运动规律,提出了非饱和土的等效固结物理模型。给出了等效两相介质固结变形过程等效骨架相应力与等效流体压力变化发展的描述。

(5) 建立了非饱和土地基一维等效固结计算分析实用方法,能够分析非饱和土固结变形的整个发展过程。

参考文献:

- [1] FREDLUND D G, RAHARDJO H. 非饱和土力学[M]. 陈仲颐,等译. 北京: 中国建筑工业出版社, 1997. (FREDLUND D G, RAHARDJO H. Soil mechanics for unsaturated soils[M]. CHEN Zhong-yi, et al. trans. Beijing: China Architecture & Building Press, 1997. (in Chinese))
- [2] DELWYN G, FREDLUND D G. Unsaturated soil mechanics in engineering practice[J]. Journal of Geotechnical and

- Geoenvironmental Engineering. ASCE/March 2006: 286 - 318.
- [3] 陈正汉, 谢定义, 刘祖典. 非饱和土固结的混合物理轮 (I) [J]. 应用数学和力学, 1993, 12(2): 127 - 137. (CHEN Zheng-han, XIE Ding-yi, LIU Zu-dian. Consolidation theory of unsaturated soil based on the theory of mixture (I) [J]. Applied Mathematics and Mechanics, 1993, 12(2): 127 - 137. (in Chinese))
- [4] 陈正汉, 谢定义, 刘祖典. 非饱和土固结的混合物理轮 (II) [J]. 应用数学和力学, 1993, 12(8): 687 - 697. (CHEN Zheng-han, XIE Ding-yi, LIU Zu-dian. Consolidation theory of unsaturated soil based on the theory of mixture (II) [J]. Applied Mathematics and Mechanics, 1993, 12(8): 687 - 697. (in Chinese))
- [5] 钱家欢, 殷宗泽. 土工原理与计算[M]. 第二版. 北京: 中国水利水电出版社, 1996. (QIAN Jia-huan, YIN Zong-ze. Geotechnical theory and calculation[M]. 2nd ed. Beijing: China Water Power Press, 1996. (in Chinese))
- [6] 谢定义, 冯志焱. 对非饱和土有效应力研究中若干基本观点的思辨[J]. 岩土工程学报, 2006, 28(2): 170 - 173. (XIE Ding-yi, FENG Zhi-yan. Consideration of some fundamental viewpoints in studying effective stress of unsaturated soils[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2006, 28(2): 170 - 173. (in Chinese))
- [7] 邵生俊, 周飞飞, 龙吉勇. 湿陷性黄土的结构性及量化参数[J]. 岩土工程学报, 2004, 26(4): 531 - 536. (SHAO Sheng-jun, ZHOU Fei-fei, LONG Ji-yong. Structural properties of loess and its quantitative parameter[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2004, 26(4): 531 - 536. (in Chinese))
- [8] 黄文熙. 土的工程性质[M]. 北京: 水利电力出版社, 1983. (HUANG Wen-xi. Engineering properties of soils[M]. Beijing: China Water Resources and Electric Power Press, 1993. (in Chinese))
- [9] 俞培基, 陈愈炯. 非饱和土的水、气形态及其力学性质的关系[J]. 水利学报, 1965(1): 16 - 23. (YU Pei-ji, CHEN Yu-jun. The pore air-water configurations and their effects on the mechanical properties of partially saturated soils[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 1965(1): 16 - 23. (in Chinese))

环境岩土工程国际学术研讨会 (ISGE2009) 会议通知 (2 号)

环境岩土工程国际学术研讨会暨 2009 年度浙江大学曾国熙讲座将于 2009 年 9 月 8~10 日在杭州召开。

本次研讨会由国际土协环境土工技术委员会 (ISSMGE-TC5) 主办, 浙江大学软弱土与环境土工教育部重点实验室、中国土木工程学会土力学及岩土工程分会 (CISMGE)、国际土工合成材料学会中国委员会 (CCIGS) 承办。

本研讨会围绕 “Reclamation of the Past and Toward a Sustainable Geoenvironment” (岩土环境修复与可持续发展) 这一主题, 研讨会将就环境土工的基本理论、环境土工的测试和监测、固体废弃物和填埋场工程、污泥和疏浚、工业废料的岩土工程再利用、矿山、尾矿坝和污泥塘、放射性废弃物处置的工程屏障、污染土壤及修复技术、土工合成材料在环境岩土工程中的应用、环境岩土工程风险评价、管理和可持续性、生态技术和工程案例、环境土工的工程实践与规范等展开讨论。

本研讨会论文集录用国内外作者的 120 余篇学术论文, 由 Springer 和浙江大学出版社共同出版, 由 ISTP 收录。

本研讨会特设 2009 年度浙江大学曾国熙讲座, 邀请国际土力学与岩土工程学会 (ISSMGE) 主席 Pedro Seco e Pinto 教授和加拿大工程院院士、2005 年郎肯讲座人 R. Kerry Rowe 教授担任讲座人。

此外, 组委会还邀请到十多位环境岩土工程领域的国际知名专家和学者担任特邀报告人, 包括 Bruno Bussiere (加拿大)、Jinchun Chai (日本)、Delwyn Fredlund (加拿大)、Stephanie Glendinning (英国)、Henken-Mellies (德国)、Stephan Jefferis (英国)、Takeshi Katsumi (日本)、Madhira Madhav (印度)、Mario Manassero (意大利)、David Richards (英国)、Jiro Takemura (日本)、Hywel Thomas (英国)、Albert Yeung (香港)、Aigen Zhao (美国) 等。

联系方式: 唐晓武教授 (浙江省杭州市浙江大学岩土工程研究所安中建工大楼 B412 室, 310058); 电话: +86-571-88208791; 传真: +86-571-88208793; E-mail: isge2009@zju.edu.cn; 网站: <http://www.ssggeo.zju.edu.cn/ISGE2009.htm>。

(大会组委会 供稿)