



对非饱和土有效应力研究中若干基本观点的思辨

谢定义¹, 冯志焱²

(1. 西安理工大学, 陕西 西安 710048; 2. 西安建筑科技大学, 陕西 西安 710048)

摘要: 鉴于当前非饱和土有效应力研究中一些值得注意的倾向, 将有效应力的实质原则和非饱和土的特殊性质相结合, 提出并分析了几个基本观点。这些观点将有益于所提问题的研究。

关键词: 非饱和土; 有效应力; 基本观点

中图分类号: TU44

文献标识码: A

文章编号: 1000-4548(2006)02-0170-04

作者简介: 谢定义(1931-), 男, 甘肃甘谷人, 教授, 主要从事土动力学、黄土力学及非饱和土力学的教学科研工作。

Consideration of some fundamental viewpoints in studying effective stress of unsaturated soils

XIE Ding-yi¹, FEN Zhi-yan²

(1. Xi'an University of Technology, Xi'an 710048, China; 2. Xi'an University of Architecture & Technology, Xi'an 710048, China)

Abstract: In view of the considerable tendency in studying the effective stress of unsaturated soils, some fundamental viewpoints were presented and analyzed on the basis of coupling the essentials of effective stress with the speciality of unsaturated soils, which were favorable to the presented problem.

Key words: unsaturated soils; effective stress; fundamental viewpoints

0 前言

国内外对非饱和土有效应力原理^[1]及表达式进行探讨的文章越来越多, 还提出了许多有新意的见解^[3-8], 打破了多年来非饱和土有效应力研究中由于对 Bishop 这一最具影响力的表达式中某种局限性的批评而造成的沉寂局面^[2], 重新将非饱和土力学中一个非常重要的问题提到了议事日程。但笔者认为, 在建立非饱和土的有效应力原理上仍有些问题值得进一步地思考。本文拟在笔者多年对其中有关非饱和土有效应力问题学习和思考的基础上, 提出非饱和土有效应力研究中的若干基本观点, 并对它们做些简单的阐明^[3]。

1 有效应力定义的实质性

太沙基针对饱和土第一次提出的有效应力概念包含了两个基本点: ①饱和土受到的总应力 σ 可分为由土骨架通过土粒的接触点来传递的有效应力 σ' 和由充满孔隙的液体, 即水来传递的孔隙水压力 u_w 两部分, 之间有 $\sigma = \sigma' + u_w$ 这一基本关系式, 即“有效应力原理”; ②土的变形和强度的变化都只取决于有效应力的变化, 而孔隙水压力不影响变形和强度, 是一种中和(或中性)压力^[2]。对于正常固结或低超固结的饱和粘性土和无粘性土, 因其一般均没有或仅有很低

的结构强度, 故在无排水条件下受荷或有排水条件下受荷的瞬间, 荷载引起的总应力全由孔隙水承担。随着孔隙中水的排出, 孔隙水压力逐渐减小, 有效应力逐渐增大, 但却始终保持着这个“有效应力原理”所示的等式关系。最后, 总应力全变为由土骨架来承担的有效应力, 孔隙水压力消散至 0, 完成了典型的固结过程。如果饱和土受荷后, 土中的孔隙水无排出条件, 则土的有效应力始终为 0, 土孔隙中的水是一种受压的非偏性应力, 均匀而法向地作用在土骨架土粒的周围, 使土骨架不致因孔隙水压力的作用而发生变形, 被称之为中和压力或中性压力。这就是说, 有效应力定义的实质性在于它必须由土骨架颗粒的接触点传递并影响土的变形和强度; 而由孔隙液体传递分担的一部分总应力应该是一种中性的应力。如果孔隙液体中的应力没有这种特性或者土骨架承担的应力不能影响土的变形和强度, 那就没有有效应力原理揭示的物理本质, 就丧失了讨论有效应力的基础和前提。毫无疑问, 研究非饱和土的有效应力原理或有效应力必须根据饱和土关于有效应力的实质性原则, 但又必须同时容纳非饱和土不同于饱和土的一系列特殊性质, 正确地面对非饱和土的三相性和结构性。

2 土骨架的结构性^[4~6]

三相土的基本结构模型是一个由固体颗粒构成不同排列、不同联结强度的多孔土骨架, 其间的孔隙由气、液两种流体以不同形式所填充的系统。非饱和土一般总具有一定的结构强度。如果作用的载荷在非饱和土的土骨架上引起的应力 σ'_0 (此时, 孔隙流体也要承担一部分应力) 小于土的结构强度 σ_0 , 则此时的应力 σ'_0 虽亦由土骨架承受, 但它并不引起土的变形, 因此, 它不能视为完整意义上的有效应力。土骨架上的应力等于结构性引起的阻抗应力, 即 $\sigma'_0 = \sigma_0$, 才是土中有效应力的起点。换句话说, 非饱和土的有效应力 σ' , 一般来说, 应该是土骨架承受的应力 σ'_0 与结构阻抗应力 σ_0 的差值^[4], 即 $\sigma' = \sigma'_0 - \sigma_0$ 。

3 土孔隙中气相的可压缩性

非饱和土的孔隙中有液相, 还有气相, 由于孔隙中的气相和含有溶解气体的液相均会有很大的压缩性, 从而使得非饱和土在没有水和气排出条件时, 也会在土骨架受荷变形的同时使孔隙流体立即承担荷载。孔隙气压力和孔隙水压力的这种迅速受荷反应或变化, 会立即导致气液界面, 即收缩膜发生某种变化, 使孔隙流体中的应力发生新的调整, 最终使非饱和土三相系统中的应力达到新的合理分配和新的平衡。

4 等效孔隙压力的中和性

既然非饱和土受外荷作用后土骨架会立即承受部分荷载, 且在这个荷载开始超过土的结构性阻抗应力而使土开始发生变形的同时, 土孔隙中的气相也受荷而发生压缩, 从而在土中要出现一个骨架应力 σ'_0 , 水-气交界面(收缩膜)两侧的孔隙水压力 u_w 和孔隙气压力 u_a 及沿收缩膜轴向作用的表面张力 T 等各力系间的动态调整过程。最终达到与该外荷相应的土内各种应力之间的新平衡。此时, 由土骨架传递并使土发生变形的应力 σ' (有效应力) 与种综合的孔隙流体应力 (等效孔隙应力) u_r 之和应等于土的骨架开始变形时作用的总应力 $(\sigma - \sigma_0)$, 即有 $\sigma - \sigma_0 = \sigma' + u_r$ 。它反映了非饱和土有效应力的基本原理。其 u_r 值是由孔隙流体本身的作用所产生, 它反映了 u_a , u_w 和 T 在具体条件下经过动态调整后使土骨架与它一起达到平衡状态时流体的受力关系, 不再影响土骨架的变形, 即它具有中和应力的特性, 且可视其为一种非偏性应力, 从而全面满足了有效应力原理的实质性条件。

5 土孔隙中气、液相压力对土骨架作用的局部性

非饱和土中, 孔隙水和孔隙气所受的压力 u_w 和

u_a 都作用在与它们相接触的土颗粒表面上。由于 u_w 和 u_a 在各自的流体内部可视为非偏性应力, 故它们都在土颗粒的表面上垂直作用。在研究土中任一断面内作用力的平衡时, 它们各自作用在自己占据的面积上。在研究土骨架上的作用力时, 理应也将它们在与土粒接触表面上的作用影响考虑进去, 但由于它们作用的水-土接触面和气-土接触面在多少与方向上都是随机变化的, 其大小也作随机变化, 即它们的作用, 大部分将互相抵销。为简化计, 它们对骨架受力的影响, 在总体上可以忽略不计, 而只考虑收缩膜张力的影响。

6 收缩膜张力的方向性

作为水气交界面的收缩膜可以气泡状态存在, 此时, 它不与土骨架接触, 对土骨架的作用只能通过收缩膜外侧的 u_w 来体现, 非饱和土属准饱和土的范畴。但在一般的非饱和土中, 收缩膜总可和土颗粒相接触, 并通过粒、膜接触面处土粒对水的吸附作用而挂在土骨架上, 将收缩膜中的 T 传递给土骨架。它作用的方向与由固体材料性质等因素决定的接触角 (视增湿和脱湿可以为推进角和撤退角) 有关。这个力是固、液、气三相的性和量相互影响的综合反映, 是造成非饱和土变形强度特殊性的一个极其主要的因素。它的方向性在各处不同, 而随土湿、密状态而变化。弄清它的工作特性和机理应是问题的核心。长期以来, 用毛细压力代替收缩膜作用的片面性已得到共识。将收缩膜张力分解为湿吸力和牵引力分别反映收缩膜张力在土粒间作用时沿颗粒中心连线 (法线) 方向的分量和粒膜接触点切线方向分量的作法^[5], 提示了收缩膜张力对土颗粒滑动所具有的实际作用。将收缩膜张力在粒膜接触点处分解为水平向与垂直向分量 (毛细压力) 的作法^[6]也有利于纠正用毛细压力代替收缩膜作用的片面性。它们都首先承认了收缩膜张力的方向性。虽然收缩膜张力一般与 u_w 和 u_{aw} 有关, 可由 $(u_a - u_w)$ 及弯液面的曲率半径 r 等为参量的关系式进行量值大小上的计算, 但这并不能反映力矢量作用的另一要素, 即实际作用的方向性。不能因 $(u_a - u_w)$ 为非偏性应力, 进而误认为与它有关并显示实质影响的收缩膜张力对土的剪应力和剪切变形没有任何贡献^[2]。因此, u_a 和 u_w 可视为无偏性应力, 但由它们只可确定相应收缩膜张力的大小, 而不能反映收缩膜张力的方向, 故由 $(u_a - u_w)$ 确定的基质吸力是收缩膜张力效应的重要部分, 但它还不是收缩膜张力效应的全部^[3, 4, 7, 8]。

7 土中应力概念的平均性

土中各处流体压力作用的孔隙在其分布、大小、多少, 有胶结力作用的粒粒接触点在其数量和方向,

有收缩膜张力作用的粒膜接触点在其数量和方向上都不同,加上颗粒介质中力的传递又会出现应力链和搭拱效应等复杂现象,土中各点应力在其涨落变化上也具有很大的随机不均匀性。因此在多孔介质特性研究中,无法将各点上的各种力都按其真实的大小、方向、着力点作用而做出计算。在处理应力问题时总是采用一个平均的概念,即在对三相承受的应力做出微观特征分析的基础上,再在不同平面内求取各种力作用在单位面积上的应力平均值,以这种应力值与宏观的材料变形强度相联系^[1-3]。研究非饱和土的有效应力时,也应分别研究土骨架、孔隙液体和气体的受力状况,列出某方向(一般可取竖向、横向和侧向)作用面上的力平衡条件,来探讨平均应力及与土性之的关系。这里表面张力、胶结力、嵌固力及结合力等的影响,从土的宏观特性上很难分开,但在机理分析上须分别考虑,并反映出它们各自的有关性质及其变化特征。

8 有效应力对本构关系的依赖性

应力应变的关系是一个最主要的本构关系。一般来说,应力是荷载作用(输入)的结果,应变是应力通过材料后做出的一种特性反应(输出),应力应该与材料本身的性质无关。但是对于土这种多孔多相松散介质,孔隙压力是它的一种特殊应力,从而衍生出有效应力的概念,开辟了一个土力学的特殊研究领域^[1-3]。即应力冠以“有效”二字的“头衔”,就给有效应力赋予了与材料相关的个性。有效应力状态与土性相关是松散多孔多相介质有别于其它固体连续介质的根本特性。饱和土的有效应力原理使与土性无关的总应力和与土性变化密切相关的孔隙水压力联系了起来。对非饱和土,有效应力也不例外地须与土性变化所对应的应力变化相联系。这不仅无可非议,而且是必由之路。因为有效应力中引入了“能引起土变形强度变化”的需要,这也就间接地将本构关系引入了有效应力。如果对于饱和土体在确定有效应力时必须先把压缩定理(实际上是一种本构关系)引入,并通过固结理论求得孔隙水的压力,那么,对于非饱和土体,要确定它的有效应力,也就必须先通过相应的本构关系,平衡条件,尤其是水、气连续条件等相关联的非饱和土固结理论来求解出能够符合动态调整平衡条件的,即综合孔隙流体应力条件的等效孔隙压力。很多试验得到有效应力的大小与应变的大小、应力路径、增减湿变化等有关,这正是这种有效应力对本构关系有依赖性的表现。这样当将应力状态分为有效应力表示法和一般应力变量表示法时,则前者必须与土的性质相联系,土性相关,是一种非纯应力性的,本构关系相关的力学变量;而后者必须与土的性质相分离,土性独立,是一种纯应力性的,本构关系无关的力学变量。

9 吸力对土物理本质特性的惟一性

非饱和土的基质吸力只能由土自身的基本物理本质来决定,即吸力是一种只能由土本身物理本质因素来决定的一种属性力。如果把土的受荷作用视为“输入”,则作为吸力计算的孔隙水压力和孔隙气压力是荷载作用通过土性而产生的自然“输出”,是土受荷后材料物理本质状态的标志。也就是说,如果对非饱和土人为地通过改变孔隙水压力或孔隙气压力来改变或控制土中的吸力,必然会导致土物理本质的某种改变。它在根本机制上不同于在饱和土中控制反压力。对饱和土,孔隙水压力(中和压力)的控制并不改变土的密度,而对非饱和土,控制新的吸力时,无论通过改变孔隙水压力还是通过改变孔隙气压力来保持二者的差值不变,土三相构成的相对含量,甚至结构状况就要发生相应的变化。因为一定的土体在一定受荷作用条件下的变形应该是确定的、惟一的,它们共同确定了与它们相适应的孔隙水压力和孔隙气压力以及剩余的结构程度。如果加(卸)荷或增(减)湿是对土体系统的“输入”,那么孔隙水压力、孔隙气压力、变形与变形后的结构状况是与它相应的“输出”。自然,把本应为输出量的一个或几个量做人地改变,并参与输入作用,对复杂的土三相系统是一种违反自然的歪曲。由此可以认为,对非饱和土做等吸力试验并不是一种可取的好方法。目前等吸力试验之所以得到广泛的应用,一方面是由于双应力变量理论需要这一根并不坚实的“拐杖”,另一方面是由于它得到了所谓“零位试验”和“应力应变关系单调性成果”的支持^[2]。但如果注意到这些试验是在保持了 $(\sigma - u_a)$ 和 $(u_a - u_w)$ 同时为常数下得到的,那它只能说明这两个应力变量是适宜的。而一般的等吸力试验却只保证了差值 $(u_a - u_w)$ 保持不变,则当另一个应力变量变化时,能否仍然保持应力应变间单调增长关系上对应条件下的相同应变值(变形才是检验的标准),并没有得到试验的检验。已有的试验已经证明,体积变化的惟一性只有在单调的增(卸)应力和单调的增(减)湿度下才能存在^[2],并没有涉及复杂的应力路径、增湿路径和剪切引起偏应变时的情况。

10 有效应力对应力应变历史的相关性

既然有效应力的大小受作为中性压力的等效孔隙压力大小的影响,而后者要随土的变形发展而动态调整以满足力平衡状态,那么它必然要受到应力、应变历史的影响。累积应变值可以视为表征和反映这个应力应变历史的量。一定粒度、密度、湿度和构度下初始状态的土,在其受荷变形过程中的不同累积应变时会具有不同的有效应力。因此,应该将累积应变引

入有效应力的确定,用它来反映应力应变历史的影响。从这个观点看问题,按强度确定的有效应力不同于按变形确定的有效应力是不足为怪的。

11 有效应力原理对土含水率变化的连续性

由非饱和土的有效应力原理建立的有效应力表达式,在土的含水率由低到高、直至饱和变化时,应该能连续地反映土中的有效应力特性,而且应该在饱和条件下退化为太沙基的有效应力原理。

12 有效应力原理对不同类非饱和土的适应性

典型非饱和土除一般的粘性土和非粘性土之外,还有湿陷性土(如黄土)和胀缩性土。虽然湿陷性土与胀缩性土在其含水率发生变化(增减)时有其不同的、甚至相反的变形性质,但作为非饱和土的有效应力原理及其表达式应该对于它们有共同的适用性,且能反映出它们所以具有不同变形特性的物质结构本质。满足这个要求似乎是困难的,但决不是不可能的。

13 有效应力变形与强度体系的完整性

建立非饱和有效应力原理及其表达式的根本目的在于用它描述非饱和土的变形强度特性规律。它必须能够在有效应力传递机理分析的基础上建立起非饱和土的应力-应变关系,并进一步根据变形的特性和大小,按一定的破坏标准确定出非饱和土的强度准则和强度指标,形成一个统一的、有效应力的变形强度体系,无需再借用其它途径,如饱和土的抗剪强度准则来确定其中的某个参数^[2]。

14 有效应力土性参数确定的简易性

非饱和土有效应力表达式中及由其建立的变形-强度规律中的土性参数,应该既有明确的物理概念,又能用土工试验的方法合理确定。确定方法应具有简易性,以便于针对不同土性条件分别测出。

15 结 论

非饱和土应该涵盖不同粒度、湿度、密度及结构的不同土类,非饱和土力学实际上应该是一种广义的土力学。它的有效应力原理及其表达式应既适用于非饱和土,也适用于饱和土,既适用于一般土,也适用于至少包括湿陷性土和胀缩性土的主要特殊土。非饱和土有效应力原理及其表达式应既坚持有效应力的实质性原则,又应反映非饱和土作为三相土的特殊性质,并在此基础上,以各相的应力传递机理为依据来寻求。

非饱和土的各种土性参数应有明晰的物理概念,并能通过土工试验的方法来测定。由它建立的变形-强度体系应便于引入到土体的变形及强度稳定性的分析。本文从非饱和土特殊性出发建立的非饱和土有效应力原理为 $\sigma - \sigma_0 = \sigma' + u_r$ 。式中 σ 为总应力, σ_0 为结构阻抗应力, σ' 为有效应力, u_r 为具有中和应力特征的等效流体压力。在这里,建立非饱和土有效应力具体表达式的关键是得到作为中和压力 u_r 值的具体形式,才能进而应用有效应力原理建立非饱和土的变形强度特性体系。对这些问题,笔者的试验研究已经得到了具体的实现。因限于篇幅,另文刊出。

参考文献:

- [1] 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,译.北京:中国建筑工业出版社,1997. (FREDLUND D G, HARIANTO Rahardjo. Soil Mechanics for Unsaturated Soil[M]. Beijing: China Architecture & Building Press, 1997.)
- [2] 谢定义,谢义川,刘奉银.非饱和土的应力传递机理及有效应力分析[J].西安理工大学学报,2001,(1). (XIE Ding-yi, XING Yi-chuan, LIU Feng-yin, Stress transmission mechanism and effective stress analysis of unsaturated soils[J]. Journal of Xi'an University of Technology, 2001,(1).)
- [3] 邢义川,谢定义,李 振.非饱和土的应力传递机理与有效应力原理[J].岩土工程学报,2002,(1):53-57. (XING Yi-chuan, XIE Ding-yi, LI Zhen, Stress transmission mechanism and effective stress principal of unsaturated soils[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2002, (1): 53-57.)
- [4] 苗天德,慕青松,刘忠玉,马崇武.低含水率非饱和土的有效应力及抗剪强度[J].岩土工程学报,2001,23(4):393-399. (MIAO Tian-de, MU Qin-song, LIU Zhong-yu, MA Chong-wu. Effective stress and shear strength of unsaturated soils in low water content condition[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2001, 23(4):393-399.)
- [5] 汤连生,王思敬.湿吸力及饱和土的有效应力原理探讨[J].岩土工程学报,2000,22(1). (TANG Lian-sheng, WANG Si-jing, Moistening matrix suction and effective stress principal of unsaturated soils[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2000, 22(1).)
- [6] 汤连生.从粒间吸力特性再认识非饱和土的抗剪强度理论[J].岩土工程学报,2001,23(4):412-417. (TANG Lian-sheng, Reunderstanding of shear strength theory of unsaturated soils from its inter-partical suction characteristics[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2001,23(4).)
- [7] LI X S. Effective stresss in unsaturated soil: a microstructural analysis[J]. Geotechnique, 2003, 53(2):273-277.
- [8] KHALILI N, KHABBZ M H. An effective stresss based on approach for shear strength determination of unsaturated soil[C]// 2nd Int Conf UNSTA'98. Beijing. 1998.