

非饱和土中有效应力及有关概念的解说与辨析

汤连生¹, 颜波¹, 张鹏程^{1,2}, 张庆华¹

(1. 中山大学地球与环境科学学院地球科学系岩土工程研究所, 广东 广州 510275;

2. 广州市城市规划勘测设计研究院, 广东 广州 510060)

摘要: 对非饱和土中有效应力及其有关的诸如表面张力、基质吸力、湿吸力、本征结构吸力和可变结构吸力进行了系统的解说与辨析, 由此提出了同时适应非饱和土和饱和土的统一的有效应力新概念及公式, 并且结合特殊性土实例说明了非饱和土的有效应力公式。

关键词: 非饱和土; 表面张力; 毛细现象; 吸力; 有效应力

中图分类号: TU442

文献标识码: A

文章编号: 1000-4548(2006)02-0216-05

作者简介: 汤连生(1963-), 男, 博士, 教授, 博士生导师, 主要从事岩土工程、地质工程、岩土化学力学及水-岩土相互作用等方面的教研工作。

Definition and exploration for effective stress and related conception in unsaturated soil

TANG Lian-sheng¹, YAN Bo¹, ZHANG Peng-cheng^{1,2}, ZHANG Qing-hua¹

(1. Department of Earth Sciences, Institute of Geotechnical Engineering, Zhongshan University, Guangzhou 510275, China;

2. Guangzhou Urban Planning Design and Survey Research Institute, Guangzhou 510060, China)

Abstract: The effective stress for unsaturated soils was reviewed, and the surface tension, matrix potential, absorbed suction, intrinsic structure suction and variable structure suction were defined and discriminated rigorously. Then a new concept and the unified formula of effective stress for saturated soils as well as for unsaturated soils were proposed. The effective stress formula was also analyzed by use of an actual case.

Key words: unsaturated soil; surface tension; capillarity; suction; effective stress

0 引言

土力学中许多基础性概念和理论的产生源于土壤学或土壤物理学。土壤学关心的是土壤中的水分, 而后出现的土壤物理学开始关心土壤的力学性质。重要概念诸如塑限、基质吸力等均是水力角度进行研究而产生的, 尤其是基质吸力的原意仅是表征土壤(非饱和土)吸水能力^[1~3]的基质吸力, 以探索土中水分运移规律或饱和状态, 后来土壤物理学将基质吸力概念用于研究土壤力学。

土力学关心的是更加侧重于土颗粒之间力学上的相互作用。文献[1,3]认识到非饱和土土力学理论基础的错误, 分析了非饱和土中的粒间吸力和有效应力, 指出粒间吸力主要由结构吸力和湿吸力决定, 研究非饱和土的有效应力, 其中结构吸力的产生原因和影响因素比湿吸力复杂得多, 它和水-土化学作用直接相关。但是, 非饱和土力学从一开始的建立至以后的发展仍然是沿袭饱和土中有效应力原理及其传统的思路, 将基质吸力或毛细吸力与湿吸力等同起来, 没有认

识到基质势、毛细压力、湿吸力和可变结构吸力等概念之间的根本差异, 更加没能认识到其随外部环境变化这些吸力所具有的非线性动态变化特征。当今, 在非饱和土土力学领域, 这种不合理的观点仍在流行, 其主要症结是人们受饱和土力学思维的影响, 以及对其他学科概念的盲目移植, 对非饱和土有效应力及相关概念存在错误的认识。其结果只能是延缓非饱和土土力学的发展, 甚至将非饱和土土力学引向歧途。因此, 有必要认识清楚与非饱和土的有效应力密切相关的土颗粒与孔隙水之间表面张力等概念。

1 表面张力与毛细现象的概念界说

1.1 表面张力

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(50279056); 广东省自然科学基金资助项目(031601); 广东省科技计划重点项目(2003C33301, 2004B32801002); 广东省地质勘查局地质科学研究基金资助项目(200510)

收稿日期: 2005-06-30

(1) 概念

表面张力是一种特殊的力, 它是液体性质的一种表现。从微观上看, 表面张力是因液体表面薄层 (约 10^{-9} m, 并非几何面) 内分子间的相互作用, 它不同于液体内部分子间的相互作用, 这种相互作用使液体表面薄层具有一种特殊性质。表面张力是分子力的一种宏观表现, 它使得表面层液体分子的移动总是尽量地使面积减小, 在液体表面形成一层弹性薄膜, 这样便出现了表面张力。

从力的角度分析, 表面张力起源于分子引力, 是由于液体表面层分子显著地受到液体内部分子引力的作用 (这中间也存在着分子斥力, 只是分子引力占了优势)。表面层外气体或其它液体分子的作用很小。于是, 表面层内分子受到上、下大小不等的力, 这两个力共同作用使表面层分子受到了一个指向液体内部的合引力, 宏观上便表现出液体表面自动收缩, 形成常见的凹液面。

从能量的角度分析, 由于液体表面以下出现了一个指向液体内部、自液面而下逐渐增强的分子引力场, 液体分子由液体内部进入分子引力场, 需要外力做功, 其分子势能将增大 (类似重力场中举起重物), 而液体分子由表面进入液体内部, 其势能会减小 (类似重力场中下落物体)。因任何物体的势能总有减小的趋势, 以使其稳定 (势能量最小原理), 所以表面层的分子总想进入液体内部以获得稳定, 使表面层分子的总势能尽可能减小。宏观上, 这一趋势使表面积趋于减小, 即液面又具有自动收缩的趋势。

(2) 表面张力系数

设想在液面上划一根长度为 L 的线段, 线段两边的液面, 以一定的力 f 相互吸引, 力的作用方向平行于液面且与此线段垂直, 大小与线段长度 L 成正比, 即 $f = \alpha L$, α 称为表面张力系数, 单位 dyn/cm ($= 10^{-5} \text{ N}$)。

不同液体表面张力不同, 是由于它们有不同的摩尔体积、分子极性和分子力。分子间作用力越大、密度越大、越不容易蒸发的液体, 其表面张力越大。比如水分子是有氢键缔合, 因此水的表面张力较大, 液态汞原子是由金属键缔合的, 其表面张力更大, 一般液体表面张力系数约为 $40 \times 10^{-3} \text{ N/m}$ 。

液体能否浸湿固体, 与其表面张力有关。表面张力系数小者 ($30 \times 10^{-3} \text{ N/m}$ 左右), 几乎能浸湿一切固体, 汞的表面张力系数很大, 仅能浸湿某些金属。

表征表面张力大小的表面张力系数与温度、压强、密度、纯度、气相或液相的组成以及液体种类等有关。通常密度小、容易蒸发的液体其表面张力系数较小, 液氢、液氮的表面张力系数很小, 汞则很大。

1.2 毛细现象

先以被硬币压弯形成的凹形薄水层 AB 为研究对象, 受力如图 1。 N 为标示硬币对凹形水薄膜的压力, f 表示凹形薄水层表面张力或其反作用力 (图 1), $F_{\text{浮}}$ 为硬币受到水的浮力, 在上述各种力均衡组合作用下, 硬币可漂浮于水面。显然, 硬币下水体中并不存在负压。硬币之所以能浮于水面, 主要是因为表面张力的作用。若凹形薄水层 AB 四周是固体而形成了圆管, 即使没有硬币的存在, 表面张力 f 也是会形成的, 并将水体张拉提升到一定高度 (如图 1 (b) 所示), 这就是众所周知的毛细 (管) 现象。毛细现象是表面张力作用的一种结果。这里要注意表面张力 f 在水平方向的分量与其在垂直方向的分量——基质吸力是完全不同的, 尽管此两分量均源于表面张力。

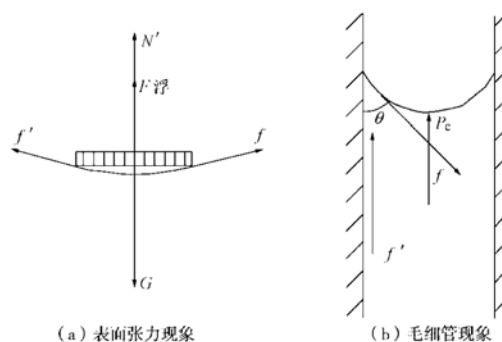


图 1 表面张力现象和毛细管现象

Fig. 1 The phenomenon of surface tension and capillarity

2 非饱和土中吸力的概念辨析

2.1 毛细吸力与毛细负压

与硬币表面张力现象一样, 毛细现象中形成的凹形水薄膜下照样是不存在负的, 其力学上仅仅是表面张力产生的竖向力 P_c (图 1) 与毛细管中水柱高度水的重力平衡, 而不是表面张力与毛细管水柱中所谓的负压达成平衡。

从压强角度来说, 凹形水薄膜下的水存在一个相当于 P_c 的真空值, 即表面张力使得凹形水薄膜下水产生了一个相当的负压力, 这就是我们通常所说的毛细负压或毛细力, 它由表面张力产生。基此也就可以说, 是该负压力 (毛细力, 值相当于 P_c) 与水柱高度中的水重力达成平衡的。实际上表面张力与该负压力相当于一对正反作用力, 其值相等而方向相反。因此, 文献[4]中表面张力 F_1 与表示该负压力的 F_2 构成一对正反作用力, 其值相等, 即

$$F_1 = F_2 \quad (1)$$

显而易见, 将 F_1 和 F_2 相加是无任何意义的。文

献[4]中将 F_1 、 F_2 之和称为总吸力是概念混淆,在力学上是错误的。Fisher R A 也犯过同样的错误^[5, 6]。恰恰式(1)是毛细力 P_c 求取的一种计算途径。

为了方便,设想图 1 中液面的半径为 r , 显然在此液面的圆周状边线上都存在着指向液层内部的表面张力,其合力为

$$F_1 = 2\alpha\pi r \cos\theta, \quad (2)$$

式中, θ 为接触角,如图 2 所示。而该液面上毛细力的合力为

$$F_2 = \pi r^2 P_c. \quad (3)$$

由式(1)~(3)得到我们熟悉的毛细(管)力计算公式

$$P_c = 2\alpha/r. \quad (4)$$

2.2 基质吸力

通常所指的基质吸力 u_c 是毛细力的宏观状态描述量,即土中一定范围的平均毛细压力,是测量部分非饱和多孔介质吸入水或排出相当体积空气的趋势,其值等于孔隙中水分的平均压力 u_w 和空气的平均压力 u_a 之差,即

$$u_c = u_a - u_w. \quad (5)$$

反过来讲,宏观上,孔隙水压力等于测量部分的土颗粒中毛细压力平均值 u_c 和空气平均压力 u_a 之差。

由此可见,基质吸力仅仅是表征在宏观上土由于表面张力产生的毛细力对水的潜在吸力,即土的吸水能力或称之为吸水势能,即为基质势,在非饱和土力学中用基质吸力表示其大小。

2.3 湿吸力^[1]

湿吸力是由于气、液、固相互作用,由水的表面张力和其与土颗粒的接触角使土颗粒间产生的吸力,它是颗粒外法向的拉应力,使颗粒间产生压应力^[1]。例如,两圆球颗粒保持一定间隙,若向此间隙滴水,可看到两圆球颗粒在接触处形成孔角毛细水并立即贴紧。湿吸力分为微观状态描述量和宏观状态描述量。通常所指的吸力 s' 则是指在一典型单元体中将微观湿吸力平均到一单位面积上所得到的平均湿吸力。

湿吸力也是饱和度、接触角、水土化学作用的函数。湿吸力与基质吸力不相同,例如,在宏观上,干土或干布等湿度很小,都有很大的基质势或负的孔隙水压力,但是土颗粒之间的湿吸力却接近于0。又如,含一定量水的湿砂比干砂更为密实,这是湿吸力作用规律的结果。

由此出现了在微观上和宏观上的基质吸力与湿吸力的关系存在着根本区别。这是湿吸力 s' 和基质吸力 p_c 或孔隙水压力 u_w 的概念及其考虑的角度不同所引起的结果。

2.4 结构吸力^[3]

在很大程度上,非饱和土的变形与强度特性不仅决定于湿吸力,更决定于土中的结构吸力。结构吸力为土颗粒之间的内拉应力,主要来源于土颗粒间的胶结作用、齿合力、表面力(双电层吸力)、磁性力、离子—静电力和偶极力等。这些力都不同程度地受土的含水率、孔隙水溶液化学性质及土的颗粒组成与排列方式的影响。按结构吸力是否会受含水率变化的影响,结构吸力可分为本征结构吸力和可变结构吸力,或分为结构吸力的本征值和可变值。由于可变结构吸力也是随饱和状态的变化而变化的,因此,非饱和土的粒间吸力(即有效应力)还包括可变结构吸力。

2.5 粒间吸力

对于饱和土,粒间作用力除了有效应力外(饱和土的有效应力包括本征结构吸力)只有孔隙水压力。然而,非饱和土与此不同,除了外力使之产生的有效应力外,作用于非饱和土颗粒上的并对颗粒间相互作用有贡献的吸力(简称粒间吸力)均是有效应力的组成部分。粒间吸力可分为本征结构吸力 s'_i 、可变结构吸力 s'_c 、湿吸力 s'_a 3类吸力^[7]。其中 s'_a 、 s'_c 两吸力均随着土的饱和状态、结构状态、物理化学状态等的变化而变化。

3 有效应力概念辨析

在研究饱和土和非饱和土的有效应力之前,必须首先要认清有效应力的真实含义,即不论是饱和土还是非饱和土,有效应力就是唯一控制土体变形和强度变化的应力状态量,无论是饱和土还是非饱和土的有效应力公式中各参数的物理意义一定是非常明确的。饱和土和非饱和土的有效应力公式实质是意义上的统一,而不止是简单的形式上的统一。

3.1 饱和土的有效应力原理

在饱和土中,根据有效应力原理,饱和土体内任一平面上受到的总应力等于有效应力加孔隙水压力,有效应力就是饱和土唯一控制其变形和强度变化的应力状态量。其表达式为

$$\sigma' = \sigma - u_w, \quad (6)$$

这就是的饱和土有效应力理论。饱和土中,有效应力概念抓住了饱和土粒间作用力的本质及变形破坏的内在规律,其物理意义明确,表达准确,而且对于变形和强度使用同一个有效应力概念,在力学分析上具惟一性。

3.2 非饱和中有效应力概念的界说与辨析

非饱和土与饱和土不一样,非饱和土是由固体土颗粒、孔隙水、孔隙气及收缩膜四相组成,而且收缩

膜具有张力特性, 颗粒间的吸力要比饱和土中的吸力复杂得多。这样似乎使得在非饱和土中寻找一个控制非饱和土变形和强度变化的唯一的应力状态量就存在很大困难或成为不可能。然而, 实际上通过上述对非饱和土粒间吸力的概念辨析之后, 充分认识非饱和土粒间吸力的含义之后, 这个问题也就迎刃而解了。

无论是饱和土还是非饱和土, 粒间的有效应力 σ' 应定义为总 (外) 应力在粒间产生的力 σ 和所有其它原因 (如表面张力、土颗粒之间的胶结力) 在粒间产生的力 s' 之和, 这里的有别于文献[8]提出的主要包括基质吸力的广义吸力, 即有效应力为

$$\sigma' = \sigma + s' \quad (7)$$

在吸力 s' 中, 本征结构吸力 s'_i 是饱和土与非饱和土共有的, 不是饱和土与非饱和土之间的区别, 而且是不随土体含水率变化的, 所以这里规定且规定随饱和度变化的力包括湿吸力和可变结构吸力才被归入 s' , 不随饱和度变化的仅被视为土中固有的本征结构吸力 s'_i 而被归入土的凝聚力。因此, 式 (7) 非饱和土的有效应力和饱和土的有效应力一样, 都是唯一控制其变形和强度变化的应力状态量, 这才是土体有效应力的实质性概念, 实际上也是非饱和土与饱和土统一的有效应力的表达式。

根据上述定义的有效应力概念, 当土为饱和状态时, s' 为负的孔隙水压力 $-u_w$ (取 u_w 值为正的), 则有效应力表达式为式 (7), 即退回为式 (6),

$$\sigma' = \sigma + s' = \sigma + (-u_w) \quad (8)$$

当土体为非饱和状态时, s' 为土中粒间各种吸力代数之和, 即 $s' = s'_a + s'_c$, 有效应力表达式为

$$\sigma' = \sigma + s' = \sigma + s'_a + s'_c \quad (9)$$

从粒间吸力分析, 可见非饱和土与饱和土的有效应力可以给出统一的表达式, 见表 1。

表 1 非饱和土与饱和土粒间吸力及有效应力

Table 1 The suctions and the effective stress of the saturated and unsaturated soils		
土的饱和状态	饱和土	非饱和土
本征结构吸力 s'_i	有	有
可变结构吸力 s'_c	无	有
湿吸力 s'_a	无	有
孔隙水压力 u_w	有	有
有效吸力 s'	$s' = -u_w$	$s' = s'_a + s'_c$
有效应力的统一表达式	$\sigma' = \sigma + s'$	

由于饱和土与非饱和土中的粒间吸力不同, 饱和土中少了非饱和土中的可变结构吸力 s'_c 与湿吸力 s'_a , 这些吸力都对非饱和土有效应力做出了不可忽略的贡

献, 对非饱和土体的力学性质有着巨大的影响, 且均承受土结构的巨大影响。而饱和土的有效应力则几乎不受结构的影响。这就是除了高压缩性的软土外, 特殊性土如黄土、红土、膨胀土全是非饱和土之故。下面试举黄土和红土为例子来说明。

4 应用实例分析

众所周知, 黄土具有湿陷性而归属为特殊土, 黄土湿陷性强度特征表现为在荷载和浸水共同作用下, 其结构遭受破坏, 土体强度明显下降。例如在黄土遇水之后, 土体重应力和外界附加应力没有变, 而随着土体饱和度改变而变化的 s'_a 、 s'_c 两吸力的减小, 使得黄土的中的有效应力减小, 土体中有效应力的减小, 直接使得土体强度减小, 而变形增大。黄土的湿陷性正是因为 s'_a 、 s'_c 两吸力的减小, 使得有效应力减小而造成的。

在研究非饱和土体的抗剪强度时, 实践证明对于非饱和土 c 、 ϕ 值并不是固定不变的参数, 而是随含水率 w 变化而变化的变量, 对于黄土, 膨胀土等一些特殊工程性质的土 c 、 ϕ 变化尤为明显。在讨论了非饱和土的粒间吸力之后, 以莫尔-库仑强度公式的形式为基础, 将本征结构吸力 s'_i 、可变结构吸力 s'_c 、湿吸力 s'_a 引入土体的强度公式:

$$\tau = s'_i + f_c(s'_c, s'_a) + \sigma' \tan[\phi_0 + f_\phi(s'_c, s'_a)] \quad (10)$$

式中, $f_c(s'_c, s'_a)$ 称为可变凝聚力函数, 是可变结构吸力 s'_c , 湿吸力 s'_a 对非饱和土凝聚力所作的贡献, $f_\phi(s'_c, s'_a)$ 称为可变摩擦角函数, 是可变结构吸力 s'_c , 湿吸力 s'_a 对非饱和土内摩擦角所作的贡献。

由于可变结构吸力 s'_c 、湿吸力 s'_a 是随土体含水率变化而变化的变量, 故可变凝聚力函数 $f_c(s'_c, s'_a)$ 与可变摩擦角函数 $f_\phi(s'_c, s'_a)$ 的值也为随土体含水率变化而变化的, 从而当土体含水率变化时函数 $f_c(s'_c, s'_a)$ 与 $f_\phi(s'_c, s'_a)$ 值的变化, 从宏观上直接表现为土体凝聚力 c 和内摩擦角 ϕ 的变化, 即可以反映出土体强度随含水率变化的特征。

对于不同种类的土, 由于土体性质, 土颗粒大小, 排列方式, 以及粒间胶结物等的区别, 函数 $f_c(s'_c, s'_a)$ 与 $f_\phi(s'_c, s'_a)$ 随含水率的变化特征是不一样的, 这种区别反映了不同土的力学性质, 而且对于不同性质的土, 函数 $f_c(s'_c, s'_a)$ 、 $f_\phi(s'_c, s'_a)$ 与本征结构吸力 s'_i 、 ϕ_0 的大小关系不一样, 在土体 c 、 ϕ 值所占大小的比例不同。正是由于这两个原因, 才使得不同土强度特征不一样。

例如, 对于黄土, 本征结构吸力 s'_i 值较小, 可变结构吸力 s'_c 随含水率提高而快速减小, 使得占凝聚力

c 值的绝大部分的 f_c 值快速下降是黄土湿陷性的根本原因。又如, 在红土中, 本征结构吸力 s_i' 比 f_c 大, 占了凝聚力 c 值的大部分, 对凝聚力 c 值的大小影响较大, 所以当 f_c 随含水率减小时在摩尔-库伦强度上表现为凝聚力 c 有的减小不显著。当红土结构破坏时, 不可恢复的本征结构吸力 s_i' 的丧失^[3], 是红土结构性强度特性的根本原因。

5 结 语

(1) 毛细管现象是由于表面张力而产生的, 但两者在概念和力的大小关系上有本质区别。

(2) 非饱和土的粒间吸力并不是表征土体吸水能力的基质吸力, 粒间吸力主要由湿吸力和结构吸力组成。

(3) 无论在饱和土或非饱和土中, 有效应力是唯一控制其变形和强度变化的应力状态量, 如式(7)所示。式(7)中随饱和度变化的力包括湿吸力和可变结构吸力才被归入 s' , 不随饱和度变化的仅被视为土中固有的本征结构吸力 s_i' 而被归入土的凝聚力。

(4) 有效应力公式中可变结构吸力 s_c' 以及湿吸力 s_a' 的大小, 及其随含水率的改变对土体的力学特性起到决定性作用。

(5) 非饱和土工程性质承受土结构巨大影响的原因是非饱和土中存在饱和土所不具有的可变结构吸力 s_c' 与湿吸力 s_a' 。实例也说明了此点。同时此方面也有待于更深入研究。

显然, 非饱和土的有效应力及其原理与抗剪强度理论确须从粒间吸力特性入手进行更深入的探索。充分认识土体中的粒间吸力及其他对有效应力的贡献, 才能正确的写出非饱和土的有效应力公式, 也是进一步深入研究正非饱和粘性土的抗剪强度及其他力学特性的前提。

参考文献:

- [1] 汤连生, 王思敬. 湿吸力及非饱和土的有效应力原理探讨[J]. 岩土工程学报, 2000, 22(1): 83 - 88. (TANG Lian-sheng,

WANG Si-jing. Absorbed suction and principle of effective stress in unsaturated soils[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2000, 22(1): 83 - 88.)

- [2] 徐永福, 刘松玉. 非饱和土强度理论及其工程应用[M]. 南京: 东南大学出版社, 1999. (XU Yong-fu, LIU Song-yu. The strength theory of unsaturated soils and its application in the engineering[M]. Nanjing: Southeast University Press, 1999.)
- [3] 汤连生. 结构吸力及非饱和土的总有效应力原理探讨[J]. 中山大学学报(自然科学版), 2000, 39(6): 95 - 100. (TANG Lian-sheng. Structure suction and principle of general effective stress in unsaturated soils[J]. ACTA Scientiarum Naturalium Universitatis Sunyatseni, 2000, 39(6): 95 - 100.)
- [4] 苗天德, 慕青松, 刘忠玉, 等. 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 - 396. (MIAO Tian-de, MU Qing-song, LIU Zhong-yu, et al. Effective stress and shear strength of unsaturated soil with low water content[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2001, 23(4): 393 - 396.)
- [5] FISHER R A. On the capillary forces in ideal soil: correction of formulas by HAINS W B [J]. J Agric Sci, 1926, 16: 492 - 505.
- [6] 罗戴 A A. 土壤水[M]. 巴逢辰, 等译. 北京: 科学出版社, 1964, 10: 41 - 43. (RODAT A A. Water in the Soils[M]. BA Feng-chen, et al, translator. Beijing: Science Press, 1964, 10: 41 - 43.)
- [7] 汤连生. 从粒间吸力特性再认识非饱和土抗剪强度理论[J]. 岩土工程学报, 2001, 23(4): 412 - 417. (TANG Lian-sheng. New suggestion on shear strength in unsaturated soil based on suction between grains[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2001, 23(4): 412 - 417.)
- [8] 沈珠江. 广义吸力和非饱和土的统一变形理论[J]. 岩土工程学报, 1996, 18(2): 1 - 9. (SHEN Zhu-jiang. Generalized suction and unified deformation theory for unsaturated soils[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 1996, 18(2): 1 - 9.)