

结构吸力及非饱和土的总有效应力原理探讨^{*}

汤连生

(中山大学地球科学系, 广东 广州 510275)

摘 要: 结构吸力也是随含水状态及饱和度的改变而变化, 由此提出了可变结构吸力和本征结构吸力的概念, 指出在研究有效应力时, 要研究的是随饱和状态而变化的可变结构吸力. 基于 ЩУКИН 的土结构强度理论, 分析了可变结构吸力计算方法和测试方法. 研究表明, 可变结构吸力除受饱和状态的影响外, 还受土颗粒几何结构的影响. 基于可变结构吸力和湿吸力, 分析并给出了非饱和土总有效应力公式及总有效应力原理.

关键词: 本征结构吸力; 可变结构吸力; 湿吸力; 非饱和土; 有效应力

中图分类号: TU431; TU411 **文献标识码:** A

吸力的存在增加了非饱和土的抗剪强度, 是由于吸力增大了土颗粒间压力, 因而, 人们研究非饱和土的变形及强度理论时也就需要发展一个有效应力及原理. 30 多年以来提出的一系列非饱和土有效应力公式, 其主要观点是将吸力随饱和度改变而变化的原因归结为饱和度对毛细压力的影响. 这些公式均是基于毛细压力或基质吸力, 而非湿吸力 (由于土颗粒被水分湿润而使土颗粒之间产生的吸力)^[1] 或可变结构吸力. 实际上, 土的抗剪强度随饱和度的改变而变化, 是可变结构吸力和湿吸力共同造成的. 土的有效应力由可变结构吸力和湿吸力两者决定. 因此, 研究非饱和土的有效应力, 就必须对湿吸力和可变结构吸力分别进行分析, 然后综合形成总有效应力, 形成非饱和土有效应力原理.

本文认为结构吸力也是随含水状态及饱和度的改变而变化, 并由此提出了可变结构吸力和本征结构吸力的概念, 指出在研究有效应力时, 只有可变结构吸力才有意义. 本文探讨了可变结构吸力的计算方法, 分析并给出了有效应力公式及总有效应力原理.

1 结构吸力的性状

1.1 本征结构吸力与可变结构吸力

在很大程度上, 结构吸力决定着土的变形与强度特性. 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量、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量变化的影响, 我们将结构吸力 s'_s 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 s'_i 和可变值 s'_c , 即有

$$s'_s = s'_i + s'_c \quad (1)$$

^{*} 基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (59779019, 59809008); 广东省自然科学基金资助项目 (970127)

收稿日期: 1999-11-29; 作者简介: 汤连生 (1963~), 男, 博士, 副教授

对于某一土(体), 本征结构吸力为, 土完全饱和后仍能保持于颗粒之间的结构吸力, 也可称为饱和结构吸力, 它对应着土的某一结构状态. 可变结构吸力为, 随着土的含水状态、孔隙水压力及其相关的水化学作用的变化而可改变的结构吸力. 前者丧失后不能恢复, 而后者是可逆的. 两者均受应力状态变化的影响. 若约定压应力符号为正, 则本征结构吸力和可变结构吸力均大于等于 0, 饱和状态土的可变结构吸力为 0.

1.2 结构吸力的丧失规律及其与有效应力的关系

土所受压应力的变化量 $\Delta\sigma$ 的增加和毛细压力的丧失均能引起结构吸力的丧失^[4]. 结构吸力本征值表现为土颗粒间的真凝聚力, 对于天然土, 它是由地质年代长期压力作用而在土颗粒水膜间产生的吸力且稳定不变, 对应着土的最原始的结构状态. 由于 $\Delta\sigma$ 的增加能改变土的结构状态, 因此 $\Delta\sigma$ 的增加不仅能(土的变形导致饱和度的变化)引起可变结构吸力的丧失, 还能(导致土结构的破坏)引起本征结构吸力的变化. 本征结构吸力丧失后不能恢复, 而可变结构吸力是可逆的.

对照饱和土及其有效应力原理, 并考虑到非饱和土的表观凝聚力由湿吸力和可变结构吸力组成, 建议非饱和土总有效应力由可变结构吸力和湿吸力决定, 而不考虑本征结构吸力. 将 $\Delta\sigma$ 的增加引起本征结构吸力的变化, 看成是土介质变形及强度本身的固有特性, 这是符合土力学规律的. 因此, 在分析与饱和状态和应力状态相关的有效应力时, 要研究的是可变结构吸力. 实际上, $\Delta\sigma$ 的变化对可变结构吸力的影响最终还是归结为饱和度对可变结构吸力的影响. $\Delta\sigma$ 的变化对饱和度的影响取决于土的变形特性.

可变结构吸力对剪切强度指标粘聚力 c 、内摩擦角 φ 两者均有贡献. 也正因为可变结构吸力随含水状态、孔隙水压力和应力状态的变化而变化, 使得不同饱和度时土的 c 、 φ 值不一样, 不同应力状态时土的 c 、 φ 值不一样, 因而使得土的力学性质更为复杂.

1.3 可变结构吸力的性状

一般来说, 组成结构吸力的各种吸力多数都不同程度地与土的饱和状态有关, 如颗粒间的胶结力、咬合力、表面力、离子—静电力等. 受含水状态及其化学性质影响最大的是胶结力, 这也是可变结构吸力的主要组成, 本文仅分析胶结作用及胶结力.

分散土颗粒的聚合及其胶结力主要靠的是颗粒之间的胶结物质与胶结界面上的化学力实现的. 胶结作用的物质基础是胶结物质和分散相颗粒表面之间的化学亲势. 在自然界, 胶结作用的前提是从孔隙水中把胶结物质分离出来, 结晶或吸附于颗粒表面, 使颗粒之间产生粘接力. 胶结作用有水成的, 也可风化形成^[3]. 胶结物质主要有硅、铝、钙、铁的氧化物或含水硅酸盐、碳酸盐以及硅化物、粘土矿物、铁质和有机质等. 当土中水分不断失去或孔液浓度提高时, 各种盐分或氧化物的逐渐沉淀或结晶作用使土颗粒胶结在一起.

胶结力分为两种类型: ①结晶沉淀物质于颗粒之间, 使颗粒产生胶结力. 由于颗粒间的结晶沉淀物质含量随着土中含水量的改变而变化, 因此, 此种胶结力将随着土含水量的改变而变化. 当土饱和时, 胶结力趋于一较小值; 当土失水干燥时, 胶结力最大. ②水中经常含有 CaCO_3 、 Fe_2O_3 等胶体, 当土沉积形成骨架后, 沉积在颗粒交接处的这些物质, 随着时间的延续胶体固化, 可把颗粒胶结起来, 从而使土强度提高. 胶体的固化是在水中形成的, 因此, 当土饱和时, 此种胶结力仍能保持一稳定值, 但随着土的饱和度降低, 这些胶体物质的胶结力也会缓慢变大.

土体遇水后胶结物质首先被溶解, 随着饱和度的减小, 胶结物质又重结晶析出或吸附

于颗粒接触处，胶结强度不断增加，土的强度不断提高。于是，随着土中水分的失而复得或得而复失，胶结力由大变小或由小变大，这是一个可逆过程。只有当孔隙水溶液的化学成分及性质（如 pH 值、粘粒含量等）发生了变化，此可逆的动态平衡过程将被打破，进入另一种可逆的动态平衡过程。水—土化学作用决定了胶结力与饱和度之间的本构关系。

2 结构吸力的变化规律及计算与测试

土的强度随含水量变化的特性是由可变结构吸力和湿吸力随含水量的变化规律所导致的。可变结构吸力的大小及变化规律由两方面决定：①颗粒间的胶结物的含量、化学成分及孔液的化学成分，此方面决定了单个接触的平均吸力及其随饱和度的变化规律；②土颗粒间接触性质，此方面决定了单位土面积上的接触点数及其随土的应力状态的变化规律。

2.1 结构吸力的计算分析

根据ЩУКИН^[3]细分散孔隙体系系统结构强度计算模型，结构吸力 s'_s 与单位接触截面上的接触点数 x 和单个接触的平均吸力 s'_d 成正比

$$s'_s = xs'_d$$

(2)

理论计算出的 s'_s 能较好地吻合断裂试验的结果。

下面对接触点数 x 和单个接触的平均吸力 s'_d 分别给予分析。

(1) 接触点数 x 称为结构吸力结构参数，由颗粒大小及与孔隙度密切有关的颗粒排列方式决定。一般，孔隙度越小，颗粒排列越紧密，单位接触截面上的接触点数就越多。

单位接触截面上的接触点数与土颗粒配置方式及土颗粒的平均半径 r 有关（Резиндер 等，1964；Амелина 等，1970；ЩУКИН，1965），其关系式为

$$x = (4r^2N^2)^{-1}$$

(3)

其中， N 为土颗粒配置方式结构参数， N 描述土颗粒的配置方式，为土颗粒间的节点到节点的颗粒平均数，如图 1。

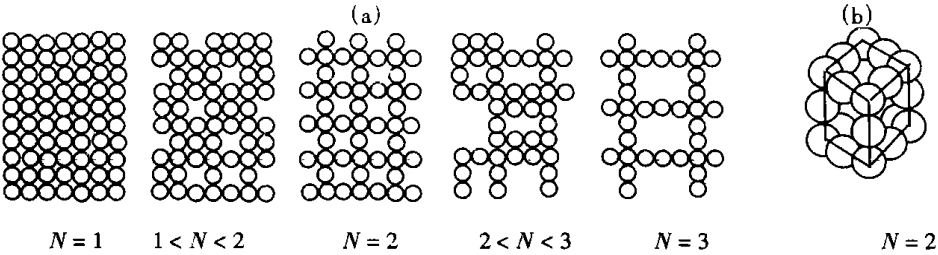


图 1 孔隙体的球状模型（据 Амелина，ЩУКИН，1970）

Fig. 1 Packing pattern model of spherical grains

(a) 空间结构单层中球形颗粒的各种配置方案，孔隙度取决于参数 N ；(b) $N=2$ 时的空间模型

在非饱和土湿吸力定量分析计算中，也有一个与土颗粒堆积方式及相接触颗粒的相对大小有关的结构参数 $D^{[1]}$ 。根据 N 与 D 的定义或其值的规律，对于几种理想的土堆积模型， D 与 N 之间存在着近似的定量函数关系

$$D = \pi(1/N)^{1/2}/2$$

(4)

例如，对于立方形规则排列的等粒球体模型， $1/N=2$ 时，(4) 式右边等于 0.707 π ，近似等于 D 的准确值 0.703 4 π ；对于四面体规则排列的等粒球体模型， $1/N=1$ 时，(4) 式右边等于 π ，

与 D 的准确值相等. 式(4) 有待于理论分析及证明.

由式(4), 式(3) 改写为

$$x = (2D^2/(\pi^2 r))^2 \tag{5}$$

显然, x 是与颗粒结构有关的参数, 是 D 及 r 的函数. 由式(5) 可得

$$D^2 = \pi^2 r x^{1/2}/2 \tag{6}$$

由此可知, D^2 正比于 $x^{1/2}$ 和 r . 但是, x 与 r 也相关, 即 x 随着 r 减小而增大. 当 r 、 x 取值适当时, D 值最大, 即这时土颗粒级配极好且排列最紧密.

根据 Амелина (1970) 和 ЮСУПОВ^[3] 及式(3), 结构参数 $1/N^2$ 、 D 与孔隙度 n 或孔隙比 e 的关系如图 2. 根据实际数据, 建议其关系按下两式计算

$$N^{-2} = N_0^{-2}((1 - n)/(1 - n_{\min}))^{2m} \tag{7}$$

$$N^{-2} = N_0^{-2}((1 + e_{\min})/(1 + e))^{2m} \tag{8}$$

式中, $n_{\min}$ 、 $e_{\min}$ 分别为土的最小孔隙度和最小孔隙比; $N_0^{-2} = 1/2$, 为 $n = n_{\min}$ 时的初始结构吸力结构参数; $m = 2$ 为常数. 对于理想的等粒圆球颗粒土, $n_{\min} = 25.95\%$. 例如, 当土颗粒排列方式为四面体最紧密堆积时, $n = 25.95\%$, $N^{-2} = 4$; 为六方体最松散堆积时, $n = 47.64\%$, $N^{-2} = 1$. 自然界中土的孔隙度大多介于理想圆球堆积的孔隙度范围 $25.95\% \sim 47.64\%$. 但是, 自然土的孔隙度的变化范围很大, 它可以超过上述孔隙度变化范围.

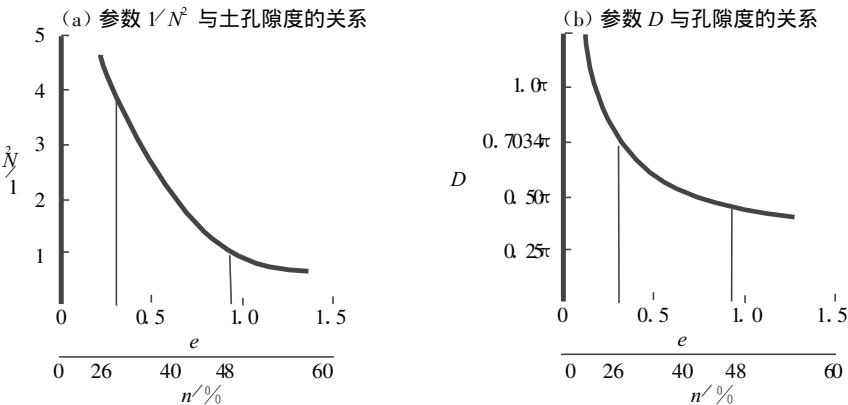


图 2 参数 $1/N^2$ (a) 和 D (b) 与土孔隙度(n) 的关系

Fig. 2 Relationship between $1/N^2$ and n (a), D and n (b)

(2) 土颗粒单个接触的平均吸力 s'_d 的大小取决于其接触类型、胶结作用、粒间水分和胶结物质的含量及化学性质等, 但对于一特定的土, s'_d 的性状仅与土的含水量有关.

假定单个接触的平均吸力 s'_d 也由其饱和状态的本征值 s'_{di} 和随饱和度而变化的可变值 s'_{dc} 组成, 即

$$s'_d = s'_{di} + s'_{dc} \tag{9}$$

据(1)、(2) 式和上式及结构吸力的本征值和可变值的定义, 有

$$s'_i = x s'_{di} \tag{10}$$

$$s'_c = x s'_{dc} \tag{11}$$

在土的强度方面, 结构吸力本征值 s'_{di} 表现在凝聚力 c 中, 它与含水量无关.

2.2 可变结构吸力的变化规律

定义单个接触的平均吸力 s'_{d} 的可变结构吸力 s'_{dc} 与土的饱和度 S_r 的关系为

$$s'_{\text{dc}} = s'_0 J(S_r) \tag{12}$$

式中, s'_0 为饱和度 $S_r = 0$ 时的初始可变结构吸力. s'_0 可通过上述土结构断裂强度试验来求得(见下述). 将上式代入(11)式得土的可变结构吸力

$$s'_c = xs'_0 J(S_r) \tag{13}$$

初步建议 $J(S_r)$ 与饱和度 S_r 之间的关系按下式计算

$$J(S_r) = (1 - S_r)^k \tag{14}$$

式中, k 为常数, 由土的颗粒接触性质、胶结物及孔隙溶液化学性质决定. 显然, $J(0) = 1$, $J(1) = 0$. 由此可得可变结构吸力随饱和度的变化规律为

$$\Delta s'_c = -kxs'_0 \Delta S_r (1 - S_r)^{k-1} \tag{15}$$

由于不同的土, 其颗粒接触性质、颗粒间胶结物质及孔液化学性质不同, 使得常数 k 不相同. 因此, 可通过试验确定不同土的 $J(S_r)$ 函数.

2.3 可变结构吸力的测试

初始可变结构吸力, 可通过土分别在饱和状态时与风干(干燥土的过程中要求不破坏土样原结构)状态时的结构断裂强度的变化求得, 其具体的做法是:

由已知 x 值和风干土结构断裂时的强度 $s'_{\text{s干}}$, 求风干土 $s'_{\text{d干}}$ 值

$$s'_{\text{d干}} = s'_{\text{s干}} / x \tag{16}$$

再由已知饱和土的结构断裂强度 $s'_{\text{s饱}}$, 则可求得饱和土 $s'_{\text{d饱}}$ 值

$$s'_{\text{d饱}} = s'_{\text{s饱}} / x \tag{17}$$

由 s'_0 的定义有

$$s'_0 = s'_{\text{d干}} - s'_{\text{s饱}} \tag{18}$$

则, 将(16)和(17)式代入上式可得

$$s'_0 = (s'_{\text{d干}} - s'_{\text{s饱}}) / x \tag{19}$$

由(19)式即可根据饱和土与干土的结构断裂的强度, 计算土中的 s'_0 .

2.4 实例

某一土的颗粒平均半径为 $r = 0.05 \text{ mm}$, 经微观分析得 $N = 1.5$, 试验获得饱和时和干燥时的结构断裂强度分别为 140 kPa , 360 kPa . 用本文的计算方法, 由(3)式可以得到 $x = 44 \text{ 点/mm}^2$, 则由(19)式可计算出单个接触点的平均初始吸力为 $s'_0 = 5.0 \times 10^{-6} \text{ kN}$, 再运用(13)式并取 $k = 2$, 则可算得该土在饱和度 $S_r = 30\%$ 、 50% 、 70% 时的可变结构吸力 s'_c 分别为 107.8 kPa 、 55 kPa 、 19.8 kPa .

3 有效应力原理

总有效应力由可变结构吸力和湿吸力两者决定. 定义非饱和土中总吸力 s' 是湿吸力 s'_a 和可变结构吸力 s'_c 的总和, 其计算公式如下

$$s' = s'_a + s'_c \tag{20}$$

湿吸力 s'_a 的计算, 要根据非饱和土的 3 种含水状态——悬挂状非饱和土、索状非饱

和土、孤立空气非饱和土, 分别采用相应的计算公式^[1]. 可变结构吸力 s'_e 可由(13)、(14)、(19)式及(3)式计算.

这里承认湿吸力和可变结构吸力均随应力路线的改变而改变, 假定土每单位面积表面受到压力 σ , 则基于总吸力的非饱和土的总有效应力原理可建立为:

(1) 非饱和土所受的总有效应力等于土每单位面积表面受到压应力和总吸力之和, 即

$$\sigma' = \sigma + s' \quad (21)$$

(2) 非饱和土的抗剪强度和变形模量唯一地取决于总有效应力.

本文探讨了结构吸力的特点, 建议结构吸力划分为本征结构吸力和可变结构吸力两部分. 分析了可变结构吸力的性状、计算方法及测试方法. 基于可变结构吸力和湿吸力, 建立了非饱和土的总有效应力原理. 分析中发现, 湿吸力的结构参数 D 与可变结构吸力的参数 N 存在着定量关系.

我们认为只有认识了土的可变结构吸力及湿吸力, 才能认识清非饱和土的力学性质. 文中所提出的一些表达式是初步的, 还需要试验和理论的证明.

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.
- [2] 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.
- [3] B. И. 奥细波夫. 粘土类土和岩石的强度与变形性能的本质[M]. 李生林, 张之一译. 北京: 地质出版社, 1985. 137~141, 148.
- [4] 胡尊国, 苏军. 多孔介质的分维特征与渗流模型[J]. 水文地质工程地质, 1990, 17(4): 61~62.

Structure Suction and Principle of General Effective Stress in Unsaturated Soils

TANG Lian-sheng *

Abstract: We hold that the structure suction are changeable along with the change of the saturation state in unsaturated soils. In view of this, the concept of intrinsic structure suction and variable structure suction are given and expounded, and this paper points out: What we should study is variable structure suction when studying the effective stress. Based on ШУКХН' s theory of structure strength of soils, the computing method for variable structure suction is analyzed, the method for measuring variable structure suction is discussed, and the following conclusions are reached: ① Besides saturation state, variable structure suction is affected also by grain composition and packing patten of grains; ② The internal relations are present between structure parameter N in computing structure suction and structure parameter D in computing absorbed suction. Based on the variable structure suction and absorbed suction, the general effective stress formula and a principle of general effective stress are proposed for unsaturated soils.

Keywords: intrinsic structure suction; variable structure suction; absorbed suction; unsaturated soil; effective stress

* Department of Earth Sciences, Zhongshan University, Guangzhou 510275, China