

非饱和土粒间吸力研究的若干思考和进展

张鹏程^{1,2}, 汤连生^{1,3}, 邓钟尉³, 姜力群³

(1. 中山大学应用力学与工程系, 广州 510275; 2. 广州市城市规划勘测设计研究院, 广州 510060; 3. 中山大学地球科学系, 广州 510275)

摘要: 非饱和土粒间吸力是建立非饱和土有效应力原理和抗剪强度理论的基础前提, 从各力的本质、概念、大小等不同角度出发, 对目前非饱和土研究中常见的几种吸力进行了详细对比和分析。基质吸力表示土壤吸水的趋势, 强调的是土颗粒与水之间的相互作用, 并非土颗粒间的相互作用, 与有效应力概念的本质不符, 是 Bishop 和 Fredlund 强度理论中分别存在着物理意义不明确参数 x 和 φ^b 的根本原因; 广义吸力虽然考虑了结构吸力的作用, 但仍将基质吸力作为有效应力的一部分, 使原本“实用、简化”的目标更加复杂化; 附加内压力将基质吸力以及表面张力的作用进行叠加, 存在力作用大小上的重复, 同时未考虑结构吸力的作用; 张力吸力将表面张力沿两土颗粒连线方向的分量——张力吸力和基质吸力进行叠加, 一是仍将基质吸力作为有效应力的一部分, 二是同样未考虑结构吸力的作用; 粒间吸力(湿吸力和结构吸力)考虑了因土体结构性引起的结构吸力作用, 同时也考虑了气液界面上收缩膜的效应——湿吸力的作用, 基于粒间吸力的非饱和土有效应力及强度理论不仅符合有效应力定义的本质, 而且合理地解释了非饱和土中诸如收缩膜张力的方向性、土中应力概念的平均性、土体物理本质的唯一性、随含水率变化的连续性以及对不同类型土的适应性等众多现象。因此, 从粒间吸力的角度出发来研究非饱和土的有效应力原理是正确、可行的。

关键词: 非饱和土; 粒间吸力; 基质吸力; 广义吸力; 张力吸力

中图分类号: P642.11⁺6

文献标识码: A

文章编号: 1000-3665(2012)02-0030-07

非饱和土的吸力问题是非饱和土力学研究的基础性课题, 对各种吸力的概念和本质认识的正确与否, 直接影响到有效应力原理及抗剪强度理论的建立。

近年来, 人们对非饱和土的粒间吸力及有效应力原理研究取得了若干重要进展。汤连生等^[1~3]在非饱和土土颗粒周围气、液界面的表面张力、毛细现象以及土体结构强度等研究的基础上, 提出了湿吸力和结构吸力的概念, 指出了现有的非饱和土有效应力原理及状态分类在非饱和土研究中不成功的两个根本原因: 一是将基质吸力或毛细吸力与湿吸力等同起来; 二是未能认识到颗粒间的吸力由结构吸力和湿吸力二者共

同决定; 沈珠江^[4]从吸力的渗流、强度、变形三种作用出发, 提出了广义吸力的概念; 苗天德^[5~6]等基于附加内压力概念, 解释了非饱和土的抗剪强度随含水率降低、基质吸力增大而增大且相互依赖关系呈非线性等重要试验现象; 贾其军^[7]等从非饱和土的微观结构入手, 提出并推导了土颗粒间毛细吸力引起的基质吸力与附加有效应力关系的近似解, 并通过试验资料和理论分析验证了所推公式的合理性、正确性; 栾茂田^[8]等在研究非饱和土的基质吸力和张力吸力基础上, 从理论上解释了“随着土变干, 饱和度对土的强度作用减弱”的试验现象等等。

一方面, 出现了众多的吸力概念, 如基质吸力、广义吸力、附加内压力、附加有效应力、张力吸力以及粒间吸力等, 那么这些概念的本质和相互间关系如何? 另一方面, 人们根据不同的吸力概念, 又如何能合理地解释一些实验现象呢?

因此, 笔者认为有必要对非饱和土粒间吸力的研究进行系统地回顾、对比、分析和总结, 然后从有效应力的本质及非饱和土的若干基本特性出发, 进一步阐述基于粒间吸力(湿吸力和结构吸力)的非饱和土有效应力的正确性和可行性。

收稿日期: 2011-07-11; **修订日期:** 2011-08-29

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(40872205); 全国高等学校博士学科专项科研基金资助项目(20070558032); 广东省科技计划项目资助(2008B030303009)

作者简介: 张鹏程(1975-), 男, 在职博士研究生, 主要从事岩土力学、非饱和土研究。

E-mail: 251253994@qq.com

通讯作者: 汤连生(1963-), 男, 教授, 主要从事岩土工程、岩土化学力学及水-岩土相互作用等研究。

E-mail: eestls@mail.sysu.edu.cn

1 回顾及展望

归纳起来,对于非饱和土吸力的认识主要有5种:基质吸力、广义吸力、附加内压力、粒间吸力、张力吸力。对非饱和土有效应力及抗剪强度理论的研究,也主要是围绕上述几种吸力来展开的。

1.1 基于基质吸力

基质吸力是非饱和土力学研究中最传统的概念,来源于土壤学,其原意是指土壤吸水的能力或趋势,即基质势。基质吸力与表面张力的关系可由毛细管理论求得,即:

$$U_s = U_a - U_w = 2T_s/R' \quad (1)$$

式中: T_s ——水的表面张力;

R' ——水气交界面收缩膜的平均曲率半径。

基于基质吸力的非饱和土有效应力及抗剪强度理论最具代表性的有 A. W. Bishop 单应力变量理论和 D. G. Fredlund 的双应力变量理论,对上述两种理论评价和讨论的文章很多,但多侧重于两种理论的公式本身或某些参数上,忽视了将基质吸力作为非饱和土有效应力一部分而使得粒间吸力概念存在着根本性的问题。

笔者认为建立在基质吸力基础上的有效应力及强度理论存在如下几个问题:

(1) 基质吸力概念的片面性。根据基质吸力的概念,土体含水量越小,即土体越干燥,其强度愈大。但事实并非如此,干燥砂土的强度可能比湿砂小;另一方面,干燥的粘性土强度大,也并非全是由于基质吸力增大的原因,因为粘性土越干燥,其颗粒间的胶结作用越强,是颗粒间的结构吸力增大所致。

(2) 基质吸力与有效应力的本质不符。从力相互作用的角度来讲,基质吸力表示土壤吸水的趋势,强调的是土颗粒与水之间的相互作用,并非土颗粒与土颗粒之间的相互作用,这有悖于有效应力是“土骨架通过颗粒之间的接触面来传递的力”^[9]这一本质的。

(3) 基质吸力的测试困难。尽管存在很多的测试方法、手段以及设备,但建立在基质吸力基础上的有效应力及剪切强度公式的正确性在实践中仍然难得到验证。正如文献[9]所说: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。

(4) 基质吸力无法合理地解释非饱和土水土特征曲线。非饱和土的水土特征曲线是描述基质吸力与饱

和度或土体体积含水量之间的关系曲线,在非饱和残余段,当土体饱和度小于残余饱和度时,随着土体饱和度的逐渐减小,基质吸力趋于无穷大。假设基质吸力是非饱和土体有效应力的重要组成部分,那么此时土体的强度趋于无穷大。这显然是不对的,任何土体的强度均是有限的。

(5) 基于基质吸力的非饱和土强度实验结果本身的自相矛盾性。一方面,非饱和土的抗剪强度随含水率降低、基质吸力增大而提高,被 Donald、Escario、Ho 和 Fredlund 等人的试验所证实^[10~11];另一方面, Fredlund 的实验结果又表明:“低含水率状态下,非饱和土的强度基本上不随饱和度而变化”^[12]。这种自相矛盾性再次说明了将基质吸力作为有效应力一部分的错误性。

1.2 基于广义吸力

沈珠江院士^[4]从非饱和土土力学实用化的角度出发,在综合考虑吸力的渗流、强度、变形三种作用的基础上,提出了广义吸力的概念,认为对非饱和土有效应力原理的研究应基于广义吸力。将能像吸力一样增加土颗粒之间抗滑阻力的因素,包括颗粒之间胶结力、咬合力和吸力(考虑其中能有效增加土体强度和抗变形能力的那个部分,即有效吸力)一起视为广义吸力 s' 。

笔者认为,广义吸力概念的提出说明了三个问题:(1) 基质吸力作为非饱和土有效应力一部分的片面性,甚至说错误性;(2) 建立非饱和土有效应力原理的复杂性及艰巨性;(3) 非饱和土的有效应力应包括土体因结构性而产生的结构吸力部分。

但基于广义吸力的非饱和土有效应力及抗剪强度理论实际上由两部分组成:一部分仍是传统意义上的基质吸力,另一部分是与颗粒之间的胶结力和咬合力有关的结构吸力。显然,广义吸力仍将基质吸力作为其重要组成部分,使原本“实用、简化”的思路再次复杂化了,这种复杂化更加导致广义吸力的确定十分困难。

1.3 基于附加内吸力

文[5]、[6]引进了附加内压力概念,将基质吸力分解为毛细吸力和附加内压力两部分,由此推导出基质吸力与抗剪强度之间的关系,解释了非饱和土的抗剪强度随含水率降低、基质吸力增大而增大且相互依赖关系呈非线性等重要试验现象。而文[7]从非饱和土的微观结构入手,提出并推导了土颗粒间毛细吸力引起的基质吸力与附加有效应力关系的近似解,并进

一步得到了低饱和度非饱和土的抗剪强度公式并分析了土颗粒半径差异、土体平均粒径大小对非饱和土强度的影响。基于附加内压力概念基础上的吸力计算公式如下:

$$F_1 = 2\pi r a \quad (2)$$

$$F_2 = \pi r^2 (U_a - U_w) \quad (3)$$

$$F_1 + F_2 = F \quad (4)$$

暂且不讨论结构吸力的作用,基于粒间附加内压力(或附加有效应力)的非饱和土有效应力及抗剪强度存在概念上的混淆:一方面将基质吸力分解为毛细吸力和附加内压力两部分,另一方面文献[7]的作者认为毛细吸力引起了基质吸力与附加有效应力,这种自相矛盾的推导和解释显然混淆了毛细吸力、基质吸力、表面张力、毛细现象等重要概念的本质和内涵。

事实上,基于粒间附加内应力的实质是将表面张力的分量 F_2 (基质吸力) 与表面张力 F_1 相加。根据上面的分析可知,将基质吸力作为对非饱和土有效应力或抗剪强度有贡献的吸力已经不正确,其次将一个力与一个力的分量进行叠加,是没有任何物理意义的。

1.4 基于粒间吸力

文献[1]~[3]在通过对非饱和土土颗粒周围气、液界面的表面张力、毛细现象以及土体结构强度系统研究的基础上,指出了现有的非饱和土有效应力原理及状态分类在非饱和土研究中不成功的两个根本原因:一是沿袭饱和土中有效应力原理及其静态的思路,即将基质吸力或毛细吸力与湿吸力等同起来,且没有认识到其中的基质势、毛细压力、湿吸力等随着外部环境变化所具有的非线性动态变化特征;二是未能认识到颗粒间的吸力由结构吸力和湿吸力决定,研究非饱和土的有效应力,就必须分别分析湿吸力和结构吸力,然后综合形成有效应力原理,并由此提出了粒间吸力的概念,粒间吸力包括湿吸力和结构吸力。

根据文[1],湿吸力 p_s 的计算公式如下:

$$p_s = (2\sigma/R) \sin(\theta + \varphi) / \sin\varphi \quad (5)$$

式中: σ ——界面张力;

θ, φ ——接触角和饱和角;

R ——颗粒半径。

1.5 基于张力吸力

文[8]基于热力学原理,提出了另外一个与基质吸力紧密相关而又不同的吸力概念——张力吸力,并通过基于水封闭非饱和土的理论计算,得出了张力吸力与基质吸力之间的定量关系,同时利用等效吸力概念,对比了由基质吸力、张力吸力所产生的等效吸力。

张力吸力 S_t 的概念是表面张力的分量在基质吸力作用范围内的等效分布,大小为:

$$S_t = T/\pi y^2 = 2\sigma \sin(\delta + \arcsin(y/R))/y \quad (6)$$

根据文[8]图中的几何关系, S_t 可以进一步表达为:

$$S_t = 2\sigma \sin(\delta + \varphi)/r = 2\sigma \sin(\delta + \varphi)/R \sin\varphi \quad (7)$$

式中: r ——饱和半径,其余符号意义同前。

对比式(5)和(7)可以发现,张力吸力并不是一个新的概念,因为无论是力的大小、作用方向(沿两颗粒圆心的连线方向),还是力的作用面积,张力吸力其实就是文[1]中早期提出的湿吸力 p_s ,详细推导过程详见文[13]。

张力吸力的提法除了进一步说明“基质吸力作为非饱和土有效应力一部分的片面性,甚至说错误性”之外,更说明了湿吸力(或张力吸力)在非饱和土力学中的重要性。图1详细地表明了上述几种吸力之间的关系。

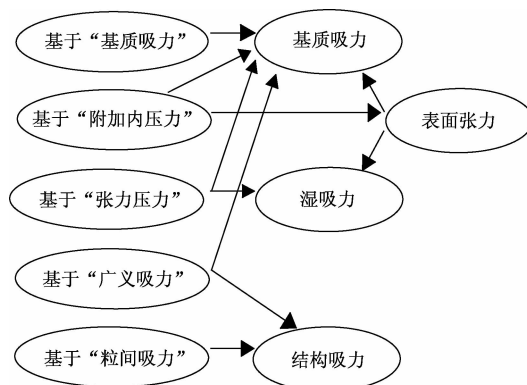


图1 非饱和土吸力之间的关系

Fig.1 Relationship between suctions of unsaturated soil

2 对比分析

研究非饱和土的有效应力必须面对两个问题:一是非饱和土气相存在时的水气交界面问题(或说收缩膜特性问题);二是结构性特性问题对于非饱和土研究和应用也显得非常重要,即由结构性的存在而产生的结构吸力问题。结合这两个问题,对上述5种吸力的认识对比、分析如下:

(1)基于基质吸力的非饱和土有效应力,未考虑结构吸力问题,虽然考虑了气、液界面上收缩膜的效应,但基质吸力并不符合有效应力的本质。

(2)基于广义吸力的非饱和土有效应力,虽然既考虑了结构吸力问题,又考虑了收缩膜的效应,但仍将基质吸力作为一部分,存在不确定性。

(3)基于附加内应力的非饱和土有效应力,未考虑结构吸力问题,虽然考虑了收缩膜的效应,但将表面张力的分量——基质吸力的效应与表面张力的效应叠加,物理意义不明确。

(4)基于张力吸力的非饱和土有效应力,未考虑结构吸力问题,虽然考虑了收缩膜的效应,但将表面张力的两个分量:垂直分量——基质吸力与水平分量——湿吸力(或张力吸力)的大小叠加,一是物理意义不明确,二是仍未意识到基质吸力的片面性。

(5)基于粒间吸力的非饱和土有效应力,不仅考虑了结构吸力问题,而且考虑了收缩膜的效应,即表面张力的水平分量——湿吸力,湿吸力不仅符合有效应力的本质,而且与基质吸力存在着本质的区别。

3 论证

文[9]结合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,从有效应力定义的实质性、土骨架的结构性、收缩膜张力的方向性等十四个方面,系统地阐述了非饱和土有效应力原理理论研究中应该注意的问题,对正确认识非饱和土中的吸力具有重要的理论指导意义。囿于篇幅,下面结合该文中的若干观点,进一步对基于粒间吸力的非饱和土有效应力的正确性和可行性进行论证。

(1)有效应力定义的实质性

有效应力定义的实质性之一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,研究非饱和土的有效应力原理必须遵循这一实质性原则^[9]。

基质吸力定义为土颗粒吸水的趋势,也称基质势,从力学的角度分析,基质吸力为土颗粒和水之间的相关作用,这显然有悖于有效应力的实质性,此其一;基质吸力没有考虑非饱和土的结构性,即结构吸力对有效应力的贡献,尤其是结构性强的粘性土,此其二。

作为粒间吸力之一的湿吸力,定义为土颗粒被水湿润而产生的土颗粒之间的作用力,从力学的角度分析,湿吸力为土颗粒之间作用的力,这显然符合“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”这一根本规律的。提出了一个新概念(湿吸力),否定了旧概念(基质吸力),对纠正人们对非饱和土有效应力原理的错误认识,促进非饱和土力学沿正确的方向上发展有着重要而深远的意义。

作为粒间吸力之二的结构吸力,定义为土颗粒之

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。结构吸力仍然强调的是土颗粒之间的相互作用,符合有效应力的本质。

(2)收缩膜张力的方向性

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)的作法也有利于纠正用毛细压力(基质吸力)代替收缩膜作用的片面性^[9]。基于粒间吸力的有效应力原理将毛细压力(基质吸力)作为收缩膜张力(表面张力)的垂直分量,而湿吸力为收缩膜张力的水平分量,将收缩膜张力分解为湿吸力和基质吸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,提示了收缩膜张力对土颗粒滑动所具有的实际作用。这再次说明了两个问题:①仅从基质吸力的角度出发来研究非饱和土有效应力原理的 Bishop 单变量表达式或 Fredlaud 双变量表达式,之所以存在这样或那样不明确的物理参数,与基质吸力代替收缩膜作用的片面性密切相关;②目前仍有众多研究者仍将基质吸力和表面张力或其分量之和作为非饱和土颗粒间的附加内压力,这是错误的,将一个力及该力的分量进行相加,是毫无力学意义的。

(3)土中应力概念的平均性

由于非饱和土土体的非均质性和各向异性,作为非饱和土有效应力一部分的粒间吸力,应能反映土体的这种特性,即单位土体单元上作用力大小的平均性。基于粒间吸力的非饱和土有效应力原理充分体现了土中应力概念的平均性:①作为粒间吸力之一的湿吸力,包括微观状态的湿吸力和宏观状态的湿吸力,微观状态的湿吸力是指微观上两个土颗粒被水湿润而产生的相互间的吸力,是接触角、饱和角及两土颗粒相对大小的函数,而宏观状态的湿吸力则是指在一典型单元中将湿吸力平均到一单位面积(或体积)上所得到的平均湿吸力,取决于土的结构性(相对密度、颗粒级配、颗粒大小等)及饱和状态。②作为粒间吸力另一部分的结构吸力,同样可分为微观状态的结构吸力和宏观状态的结构吸力,微观状态的结构吸力是指微观上两个土颗粒之间胶结作用(当然也有其它作用)所产生的作用力,取决于胶结物的含量和饱和度;而宏观状态的结构吸力指在一典型单元土体中将结构吸力平均到一单位面积(或体积)上所得到的平均结构吸力,取决于土体的结构状态及饱和状态。

(4)粒间吸力反映土体物理本质的唯一性

宏观状态的湿吸力与土颗粒的级配排列、接触角、饱和角、表面张力系数等有关,对于某一特定的非饱和土体来说,在一定的结构状态(颗粒密度、排列等)、含水量状态下,湿吸力为一定值,其反映了土体物理本质的唯一性。

宏观状态的结构吸力的大小取决于单个接触点处平均结构吸力的大小与单位面积上土颗粒的接触点数,而单个接触点处平均结构吸力与其接触类型、胶结作用、粒间水分和胶结物质的含量及化学性质等有关,其性状仅与土的含水量有关,也就是说,结构吸力仍然与土体某一特定的结构状态和饱和状态相对应,即物理本质上的唯一性。

(5) 粒间吸力与加(卸)载、增(减)湿的相关性

在外部荷载的作用下,土体的结构状态可能发生变化,如土颗粒的重新排列等,必将导致湿吸力的变化,因为湿吸力与土颗粒的排列有关,这显示了湿吸力与外部荷载的相关性;非饱和土在含水量增加(增湿)或减小(减湿)的过程中,由于湿吸力与接触角和饱和角有关,而液体向固体推进时的接触角(推进角)和液体由固体表面撤退时形成的接触角(撤退角)可以不同,这就导致了湿吸力与增(减)湿的相关性。

土所受压应力的变化量 $\Delta\sigma$ 的增加引起结构吸力的丧失。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。可见结构吸力与加(卸)载的相关性。

(6) 粒间吸力对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^[9]。

粒间吸力(湿吸力和结构吸力)同样反映了含水率变化的连续性:①在土的含水率由低到高、直至饱和变化时,宏观状态的湿吸力先逐渐变大,达到峰值后,又逐渐变小,直至等于零;②可变结构吸力随含水率增大而逐渐减小,至土体饱和时,可变结构吸力等于零,此时结构吸力表现为本征结构吸力。

(7) 有效应力原理对不同类型非饱和土的适应性

对于非饱和的砂性土,也许湿吸力对有效应力起主导作用,对非饱和的粘性土,也许结构吸力对有效应力起主导作用(当然不排除湿吸力的作用)。可见基于粒间吸力(湿吸力和结构吸力)的非饱和土有效应力原理是充分考虑了不同类土体的差异性的。

此外,从湿吸力和结构吸力的角度出发,分别对特殊性土类如具有膨胀性的膨胀土和具有湿陷性的黄土的成功解释^[3],也充分说明了粒间吸力对不同类非饱和土的适应性。

4 结论

(1)无论是从有效应力概念的本质出发,还是从基质吸力本身的概念上来看,将基质吸力作为非饱和土有效应力有贡献的吸力之一是错误的:基质吸力原意是指非饱和土吸水的趋势,这正如放在一个斜面(倾角为 θ)上的物体(重量为 G),虽然存在下滑的趋势(倾角 θ 越大,下滑的趋势越大),但实际上并不存在所谓的下滑力 $G\sin\theta$,物体仅且仅受到重力 G 的作用(对于光滑斜面)。

(2)无论是力的大小、作用方向和力的有效作用面积,张力吸力就是文献[1]中的湿吸力。从张力吸力的角度出发来研究非饱和土有效应力,恰恰证明了将湿吸力(张力吸力),而非基质吸力,作为非饱和土有效应力一部分的科学性和正确性。

(3)广义吸力仍将基质吸力作为其重要组成部分,使原本“实用、简化”的企图再次复杂化了,这种复杂化更加导致广义吸力的确定十分困难。

(4)《表面物理学》教程清楚地表明:毛细现象是润湿现象发生在毛细管中的表现,而润湿现象和毛细现象从本质上讲都是由于物体表面张力作用的结果。毛细管现象是由于表面张力而产生的,而基质吸力为表面张力的一个分量,但两者在概念和力的大小关系上有本质区别,将表面张力及其分量之一的基质吸力所产生的力学效应相加,是没有任何物理意义的。基于附加内压力的非饱和土有效应力原理,将基质吸力分解为毛细吸力和附加内压力两部分,不仅错误地将基质吸力作为非饱和土有效应力有贡献的吸力之一,而且存在概念上的混淆。

(5)无论是从有效应力原理的本质出发,还是综合考虑非饱和土的相态、吸力及结构等特性,从粒间吸力(湿吸力和结构吸力)的角度出发来研究非饱和土的有效应力原理是正确的、可行的。

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 L S, WANG S J. Absorbed suction and principle of effective stress in unsaturated soils[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2000, 22(1): 83 - 88. (in Chinese)]
- [2] 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 L S. New suggestion on shear strength in unsaturated soil based on suction between grains[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2001, 23(4): 412 - 417. (in Chinese)]
- [3] 汤连生, 颜波, 张鹏程, 等. 非饱和土中有效应力及有关概念的解说与辨析[J]. 岩土工程学报, 2006, 28(2): 216 - 220. [TANG L S, YAN B, ZHANG P C, *et al.* Definition and exploration for effective stress and related conception in unsaturated soil[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2006, 28(2): 216 - 220. (in Chinese)]
- [4] 沈珠江. 非饱和土力学实用化之路探索[J]. 岩土工程学报, 2006, 28(4): 256 - 259. [SHEN Z J. Exploitation of practical use of Unsaturated soil mechanics[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2006, 28(4): 256 - 259. (in Chinese)]
- [5] 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 T D, MU Q S, LIU Z Y, *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. (in Chinese)]
- [6] 慕青松, 马崇武, 苗天德. 低含水率非饱和砂土抗剪强度研究[J]. 岩土工程学报, 2004, 26(5): 674 - 678. [MU Q S, MA C W, MIAO T D. Research on shear strength of unsaturated sand with low moisture content[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2004, 26(5): 674 - 678. (in Chinese)]
- [7] 贾其军, 赵成刚, 韩子东. 低饱和度非饱和土的抗剪强度理论及其应用[J]. 岩土力学, 2005, 26(4): 580 - 585. [JIA Q J, ZHAO C G, HAN Z D. Study on shear strength of the unsaturated soils in pendular state and its application[J]. Rock and Soil Mechanics, 2005, 26(4): 580 - 585. (in Chinese)]
- [8] 栾茂田, 李顺群, 杨庆. 非饱和土的基质吸力和张力吸力[J]. 岩土工程学报, 2006, 28(7): 863 - 868. [LUAN M T, LI S Q, YANG Q. Matric suction and tension suction of unsaturated soils[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2006, 28(7): 863 - 868. (in Chinese)]
- [9] 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 D Y, FENG Z Y. 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)]
- [10] Escario V. The shear strength of partly saturated soils[J]. Geotechnique, 1986, 36(3): 453 - 456.
- [11] Krahn J, Fredlund D G. On total, matric and osmotic suction[J]. J Soil Sci, 1972, 114(5): 339 - 348.
- [12] 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, 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]. Translated by CHEN Z Y, ZHANG Z M, *et al.* Beijing: China Architecture and Building Press, 1997. (in Chinese)]
- [13] 张鹏程, 汤连生. 关于“非饱和土的基质吸力和张力吸力”的讨论[J]. 岩土工程学报, 2007, 29(7): 1110 - 1113. [ZHANG P C, TANG L S. Discussion about “matrix suction and tension suction of unsaturated soils”[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2007, 29(7): 1110 - 1113. (in Chinese)]

Development and thinking of research on the suction between grains of unsaturated soils

ZHANG Peng-cheng^{1,2}, TANG Lian-sheng^{1,3}, DENG Zhong-wei³, JIANG Li-qun³

(1. *Department of Applied Mechanics and Engineering, Sun Yat-Sen University, Guangzhou 510275, China*; 2. *Guangzhou Urban Planning Survey and Design Institute, Guangzhou 510060, China*; 3. *Department of Earth Sciences, Sun Yat-Sen University, Guangzhou 510275, China*)

Abstract: Suction between grains of unsaturated soil is the foundation of establishing theory of unsaturated soil effective stress and shear strength. From the essence, concept, size of all suctions, several common suctions in research of unsaturated soil at present are compared and analyzed in detail this paper. Matrix suction represents the trend of absorbing water of soil, emphasizing the interaction between soil grains and water, not the interaction among soil grains. There are parameters α and φ^b in Bishop and Fredlund's theory of strength, which do not have clear physical meaning, because their theories are in disagreement with the essential concept of effective stress. Though generalized suction involves the effect of structure suction, it lets matrix suction be a part of effective stress, making it practical, simple and more complicated. Additional inner pressure superposes the effect of matrix suction on surface tension suction, so reduplication of suction effect exists, and it doesn't consider the effect of structure suction. Tension suction superposes tension suction on matrix suction, that is, two kind of suctions are component of surface tension suction along two grains connective direction. On the one hand, it still makes matrix suction a part of effective stress, on the other hand, it also doesn't consider the effect of structure suction. Suction between grains (wet suction and structure suction) considers the effect of structure suction because of soil structure, at the same time, it also considers the effect of shrink film of gas-liquid interface, namely the effect of wet suction. Unsaturated soil effective stress theory and shear strength theory based on suction between grains are not only in agreement with the essential definition of effective stress, but also successfully explain so many features of unsaturated soil such as the directivity of shrink film tension, the average of concept of stress existing in soil, the uniqueness of soil physical essence, the continuity with the change in water content and the adaptability for different kinds of unsaturated soil. Therefore, studying effective stress theory of unsaturated soil from the suction between grains is correct and feasible.

Key words: unsaturated soil; suction between grains; matrix suction; generalized suction; tension suction

责任编辑:张明霞