

基于孔隙水赋存状态的非饱和土吸力量测分析

李彦龙¹, 张小辉²

(1. 许昌学院 土木工程学院, 河南 许昌 461000; 2. 机械工业勘察设计院有限公司, 陕西 西安 710043)

摘要: 非饱和土中孔隙水在不同含水量条件下的赋存状态各异, 孔隙水的赋存状态随着土体含水量的增加可分为结合水状态、毛细角边水状态和毛细水连通状态。由不同类型的孔隙水所引起吸力的机理各不相同, 对应于孔隙水的 3 种赋存状态, 吸力可分为吸附作用力、吸附—毛细作用力和毛细作用力。吸附作用力可通过等温吸附试验确定, 其试验原理和试验结果均较为明确。毛细作用力的计算原理虽较为明确, 由于参数取值的困难致使难以通过理论计算获得准确的结果, 但可通过高进气值材料测量。分析认为高进气材料较为适合量测毛细作用力, 对高进气值材料不恰当的使用是造成土水特征曲线在低含水量段迅速上扬的主要原因。吸附—毛细作用力尚难以通过理论计算或试验获得准确的结果, 该吸力在数值上介于吸附作用力和毛细作用力之间。

关键词: 非饱和土; 孔隙水; 吸力

中图分类号: TU43

文献标志码: A

文章编号: 1006-7930(2019)03-0362-07

Determination analysis of unsaturated soil suction based on pore water occurrence

LI Yanlong¹, ZHANG Xiaohui²

(1. School of Civil Engineering, Xuchang college, Hennan Xuchang 461000, China;

2. China JIKAN Research Institute of Engineering Investigations and Design Co., Ltd, Xi'an 710043, China)

Abstract: The occurrences of pore water in unsaturated soil are different with water content conditions, they were divided into bound water state, capillary edge water state and capillary water connected state with the increase of water content. The mechanisms of the different suction caused by different types of pore water were different. Corresponding to the three kinds of pore water occurrence, suction in unsaturated soil was divided into adsorption force, adsorption-capillary force and capillary force. The adsorption force can be determined by isothermal adsorption test, and the test principle and results are all clear. The calculation formula of the capillary force is explicit; however, it is difficult to obtain the accurate result by theoretical calculation due to the difficulties to obtain the parameter value. Nevertheless, the capillary force can be measured by high entry material. The results of analysis indicate that the high entry material is suitable for measuring the capillary force, and the improper use of the high entry material is the main reason for the rapid increase of the soil water characteristic curve in the low water content section. It is difficult to obtain accurate results of adsorption capillary force by theoretical calculation or experiment. The value of adsorption capillary force is between the adsorption force and the capillary force.

Key words: unsaturated soil; pore water; suction

吸力是非饱和土力学理论体系中的核心变量, 对非饱和土体的强度、变形和渗流均具有重要影响。孔隙水在非饱和土中的赋存状态各异, 由此所引起的吸力不管是形成机理还是大小都相差甚远。Fredlund 和 Rahardjo^[1] (1993) 把根据相对湿度所确定的吸力称为总吸力, 包括基质吸力 ($u_a - u_w$) 和渗透吸力 (π) 两部分。Lu 和 Likos^[2] (2004) 把非饱和土中的吸力分为吸附作用力、毛细作用力和渗透作用力, 并把吸附作用力和毛细作用力之和

定义为基质吸力。事实上基质吸力的概念来源于土壤学, 目的是反映土体的吸水能力^[3]。20 世纪中后期, 学者们在建立非饱和土土力学理论时, 把基质吸力的概念简单地应用于非饱和土力学中, 致使在非饱和土力学中难以建立类似于经典土力学中的有效应力原理, 最为直接的表现是 Bishop^[4] (1960) 和 Fredlund^[5] (1978) 所提出的非饱和土抗剪强度公式中的参数 χ 和 φ_b 缺少明确的物理意义。为了更为准确地描述非饱和土的应力和变形问题,

收稿日期: 2017-05-22

修改稿日期: 2019-05-06

基金项目: 河南省重点研发与推广专项(科技攻关)项目(No. 192102310220); 河南省高等学校重点科研项目(No. 19A560019)

第一作者: 李彦龙(1985—), 男, 博士, 讲师, 主要从事岩土工程的教学和科研工作。E-mail: liyanlong1229@163.com

学者们对非饱和土中的吸力进行了更为细致的分类. 沈珠江^[6] (1996)为了把饱和土的有效应力原理推广为广义有效应力原理,提出了广义吸力的概念. 汤连生等^[7-8] (2000, 2001)把非饱和土颗粒间的吸力分为结构吸力、湿吸力和基质吸力,在此基础上分析并指出了 Bishop 抗剪强度公式中参数 χ 以及 Fredlund 抗剪强度公式中参数 φ_b 的物理意义. 栾茂田等^[9] (2005, 2006)提出了等效基质吸力的概念,将其定义为基质吸力在整个土表面上的平均吸力,并在此基础上对非饱和土进行了重新分类,把水封闭状态下非饱和土中的吸力分为张力吸力和基质吸力.

上述非饱和土吸力的分类方法主要是针对非饱和土的强度和变形问题^[10],这些分类方法深化了学者们对非饱和土强度和变形问题的认知,并有效地推动了非饱和土强度和变形理论的发展. 然而上述分类方法仍存在两个方面的问题:其一,上述非饱和土吸力分类方法主要是基于吸力对土体强度的贡献而进行的分类,不同类型吸力的确定方法较为模糊;其二,非饱和土中的渗流问题与强度问题和变形问题既密切相关又有本质上的不同,当用上述分类方法来描述非饱和土中的渗流问题时具有局限性. 鉴于此,本文将从非饱和土中的孔隙水的赋存状态入手,对非饱和土中的吸力进行分类并给出不同类型吸力的确定方法.

1 非饱和土孔隙水的赋存状态

根据非饱和土中孔隙水的受力状态可以把其分为结合水、毛细水和重力水. 结合水主要受电场力和范德华力控制,毛细水主要受气液交界面上的表面张力的作用,重力水在重力的作用下便能自由地流动. 土体中的孔隙水在土体中的赋存状态与土体的含水量有密切的关系. 图1描述了非饱和土孔隙水3种典型的赋存形式.(1)结合水状态(图1(a)):土颗粒表面仅包裹着结合水,此时土体中的孔隙水以结合水的形式存在.(2)毛细边角水状态(图1(b)):随着土体含水量的增加,非饱和土中开始出现毛细水,此时的毛细水也被称为毛细边角水^[11];毛细边角水仅在土颗粒之间较为狭小的孔隙中存在,液相未联通.(3)毛细水连通状态(图1(c)):当土体的含水量继续增加时,土体中的毛细水开始连通.

将土体中结合水含量的上限定义为结合水含水量,用 θ_b 表示;将能够维持毛细水连通的含水

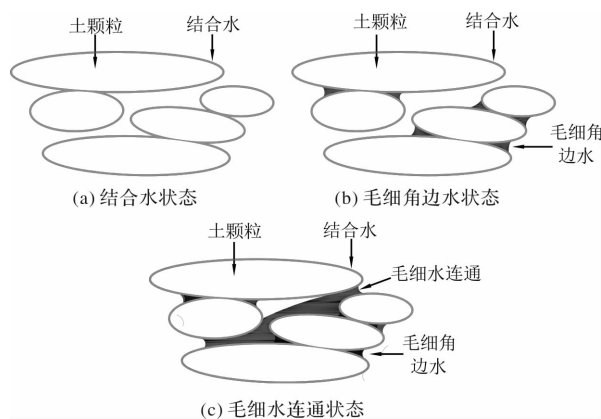


图1 孔隙水的赋存形式

Fig. 1 Occurrence forms of pore water

量的下限定义为毛细水连通含水量,用 θ_c 表示. 由此,土体中含水量从高到低可依次分为:饱和含水量(θ_s)→毛细水连通含水量(θ_c)→结合水含水量(θ_b). 上述3个特征含水量中比较容易确定的特征含水量为饱和含水量(θ_s),通过理论计算和试验均能获得土体的饱和含水量(θ_s). 土体中结合水的含量(θ_b)可通过等温吸附法和热重分析法得以确定^[12-13]. 尚未确定的特征含水量为毛细水连通含水量(θ_c). 由于 θ_c 为土体中毛细水连通时含水量的下限,因此,有理由认为 θ_c 与土体的饱和度有直接关系. 基于 Barden^[14] (1956)对非饱和土的分类,可以做出如下判断:当土体中毛细水连续时,其饱和度应该大于 50%. 事实上,通过非饱和土水分迁移试验也可以初步确定毛细水连通时的含水量,当非饱和土中的毛细水尚未联通时,土体中的水分在迁移形态上表现为以气态水为主的水分迁移^[15].

2 基于孔隙水赋存状态的吸力分类

土体中水气交界面的弯曲、溶质的溶解作用、电场势能的变化以及范德华力场的变化均会导致孔隙水势能的下降,所有势能下降的综合便构成了非饱和土的吸力^[2]. 本文对非饱和土中吸力的分类主要是基于土颗粒与水之间的相互作用力,忽略温度和重力的影响,促使土体中孔隙水势能下降的主要因素为吸附作用、毛细作用和渗透作用等. 渗透吸力是由于溶质的水合作用使水的活性下降,而且只有在半透膜存在的情况下才起作用,但是,土体中一般不存在半透膜. 因此,非饱和土中的吸力主要是指结合水与土颗粒之间的吸附作用和毛细水的毛细作用两部分. 对应于土体中孔隙水的3种赋存状态,将非饱和土的吸力分为如下3类.

(1) 吸附作用力: 土体中仅含有结合水, 土颗粒与结合水之间的相互作用力主要表现为由电场力和范德华力所控制的吸附作用. 电场源自粘土矿物表面所带的负电荷, 周围水分子偶极子、阳离子因静电引力而被吸附在粘土颗粒表面, 离表面愈近, 吸附力愈大, 吸附愈紧. 范德华力是一种存在于任何土体中的原子尺度范围内的力, 是土颗粒表面分子与孔隙水分子之间的相互作用力. 电场力和范德华力的作用强度随着土颗粒与水分子距离的增加迅速减弱. 二者的相互作用促使相邻孔隙水分子相互吸引和重新排列并引起孔隙水化学势能的下降, 这些下降的孔隙水化学势能构成吸附作用力.

(2) 吸附——毛细作用力: 吸附——毛细作用力主要包括吸附作用力和由毛细角边水所产生的局部毛细作用力, 此时土体中的孔隙水以结合水和毛细角边水并存. 随着含水量的增加, 毛细水首先赋存于土体中狭小的孔隙中, 该部分毛细水被称为毛细角边水. 毛细角边水与气相交界面上的收缩膜与土颗粒接触, 并将收缩膜上的张力传给土骨架, 表现为局部毛细作用力. 汤连生等^[7-8]将此时收缩膜张力分解为湿吸力和牵引力, 栾茂田等^[9]将收缩膜张力定义为张力吸力. 上述分类均反应了此时非饱和土中土颗粒与水之间复杂的受力状况.

(3) 毛细作用力: 当土体中的毛细水连通时, 土体中的吸力主要表现为由孔隙水的毛细作用所产生的吸力, 即基质吸力. 基质吸力是土体中一定范围内的平均毛细压力, 其值等于空气的平均压力与水分的平均压力之差, 即 $(u_a - u_w)$. 随着含水量的增加, 气液交界面收缩膜与土颗粒由搭接状态逐渐过渡到不搭接状态, 收缩膜对土体的作用下效应也随之下降.

上述不同形式的吸力与含水量之间的关系见图 2, 可以看到以 θ_c 和 θ_b 为分界点可以将土水特征曲线分为 3 段, 其中 θ_a 为进气值.

(1) 吸附作用区 ($0 < \theta < \theta_b$), 土体中的气体处于连通状态, 土颗粒表面仅包裹着结合水, 此时非饱和土中的流动问题主要表现为气体的流动.

(2) 吸附毛细作用区 ($\theta_b < \theta < \theta_c$), 土体中的毛细角边水处于气封闭状态, 孔隙气与大气连通, 当土体内部水气的蒸汽压大于大气中水气的蒸汽压时, 毛细边角水便会以气态水的形式向周围大气中扩散, 即发生气态水迁移(蒸发). 反之, 蒸汽浓度较高大气便在土体中冷凝形成冷凝水, 从而使土体中的含水量增加. 此时土体中水分迁移主要

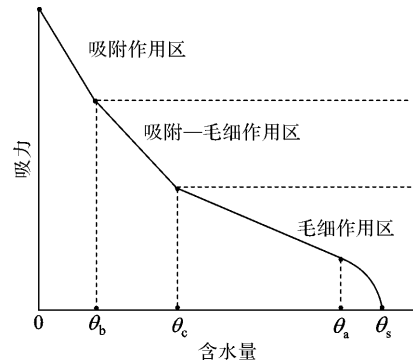


图 2 吸力与含水量之间的关系示意图

Fig. 2 Suction versus moisture content

是气态水为主.

(3) 毛细作用区 ($\theta_c < \theta < \theta_s$), 土体中的毛细水连通, 随着含水量的增加孔隙气逐渐开始变的不联通, 直至最后形成气封闭状态. 此时, 非饱和土中的渗流主要以液态水迁移为主.

3 吸力的确定方法

3.1 吸附作用力

土颗粒与结合水之间的吸附作用力受控于二者之间的电场力和范德华力, 电场力和范德华力促使孔隙水分子相互吸引和重新排列并引起孔隙水化学势能的下降, 吸附作用力的大小可以通过结合水化学势能的下降量来衡量. 对吸附作用力的确定主要是通过等温吸附试验, 试验中, 处于平衡状态的封闭系统内各相的化学势能相等, 也就是土样表面吸附结合水的化学势能与干燥皿内水气的化学势能相等. 因此, 可以用气相的化学势能来表示结合水的化学势能. 吸附达到平衡时, 各相的偏摩尔自由能相等, 也就是结合水的 Gibbs 自由能与体系中水气的 Gibbs 自由能相等. 相对于自由水, 水气 Gibbs 自由能的变化为

$$dG = Vdp - SdT - \delta W \quad (1)$$

由于等温吸附试验中的温度为定值 (25°C), 所以 $dT = 0$; 土颗粒在等温吸附水气的过程中, 非体积功为零, 即 $\delta W = 0$. 因此, 式(1)即为

$$dG = Vdp \quad (2)$$

对于一摩尔水气而言, 由理想气体定律可知 $pV = RT$, 由此式即为

$$dG = Vdp = \frac{RT}{p} dp \quad (3)$$

对式(3)积分, 可得

$$\Delta G = \int_{p_0}^p Vdp = RT \ln \frac{p}{p_0} = RT \ln(RH) \quad (4)$$

式中: RH 为相对湿度; p_0 为自由水的饱和蒸气压; p 为平衡状态时溶液的蒸气压; T 为热力学温

度; R 为理想气体常数; ΔG 即为吸附势能 (J/mol). 需要说明的是, 式的计算结果为负, 负号表示孔隙水相对于自由水的自由能的下降值, 即吸附势能. 可以将式转化为以压力势能 (Pa) 来表示. 势能通常有 3 种表述方式: ①化学势能 μ ; ②压力势能 ψ ; ③水头势能 h , 三者之间的关系式如下.

$$\mu = \psi \nu_w = h g \omega_w; \quad (5)$$

式中: g 为重力加速度; ω_w 为水的摩尔质量 (kg/mol); ν_w 为水的偏摩尔体积 (m^3/mol). 转换单位后式(4)如下.

$$\psi = -\frac{RT}{\nu_w \omega_w} \ln(RH) \quad (6)$$

式(6)即为 Kelvin 方程, Kelvin 方程可用于描述弯曲液面上方蒸汽压与曲率之间关系的方程; Kelvin 方程可用于解释中孔材料 (2~50 nm) 所对应的 IV 型等温线上的拐点, 即发生毛细凝聚的相对湿度; 等温吸附线拐点以下部分为吸附作用力 (吸附势能). 25 °C 时, $\nu_w = 1/997 m^3/kg$ 、 $\omega_w = 18.016 kg/mol$ 、 $R = 8.314 32 J/(mol K)$, 将上述参数代入式(5)中, 可以计算得到吸附作用力与相对湿度之间的理论关系 (图 3). 在此, 以 Li (2016) 对黄土的等温吸附试验结果为例进行下述分析. 黄土的等温吸附的试验结果表明: 干燥的黄土颗粒在 $RH < 11\%$ 、 $RH = 11\% \sim 75\%$ 的湿度环境中吸附水汽形成的水分分别为强结合水、弱结合水; 当 $RH = 75\%$ 时, 水气在土样中冷凝并形成毛细水. 从图 3 中可以到, 黄土土样中强结合水 ($RH < 11\%$) 与土颗粒之间的吸力的下限为 302.8 kPa, 弱结合水 ($RH = 11\% \sim 75\%$) 与土颗粒之间的吸力为 39.5~302.8 kPa, 发生毛细冷凝时的起始吸力为 39.5 kPa.

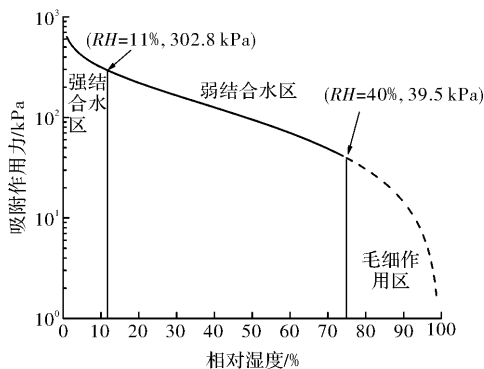


图 3 吸附作用力与相对湿度的关系 (25 °C)

Fig. 3 Relationship of adsorption suction and relative humidity (25 °C)

上述对于由毛细作用所引起的吸力的计算结果与通过轴平移技术测量^[16]所得到的结果之间存

在差异性, 其原因如下: Fredlund 和 Rahardjo^[1] (1993) 把根据 Kelvin 方程所确定的吸力称为总吸力, 事实上, Kelvin 方程主要用来衡量土颗粒与结合水之间的吸附作用力以及土体中发生毛细冷凝时的起始吸力, 当土体中已处于毛细角边水状态或毛细水连通状态时, 通过 Kelvin 方程难以准确地获得土体中的吸力, 原因如下: 第一, Kelvin 方程中的核心变量为相对湿度, 影响气相相对湿度的因素有很多, 比如, 温度、水分的可用性等; 当土体中已处于毛细边角水状态或毛细水连通状态时, 相对湿度与土体的含水量并非单值对应. 第二, Kelvin 方程中缺少衡量土体密实状态的参数, 事实上, 密度对土体的吸力具有显著的影响, 尤其是当土体含水量较低时^[17-18].

3.2 毛细作用力

液体在毛细管中上升或者下降称为毛细现象, 非饱和土中的毛细水通常表现出上升现象, 毛细水上升高度主要取决于气液交界面上表面张力的大小. 弯曲液面的曲率与附加压力的关系可以用 Young-Laplace 方程来描述, Young-Laplace 方程如下:

$$\Delta p = T_s \left(\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} \right) \quad (7)$$

式中, Δp 为液相的附加压力, T_s 为表面张力, R_1 和 R_2 分别为弯曲液面的两个主半径. 设毛细管的半径为 R , 液体与毛细管接触角为 θ , 毛细管中弯曲液面的曲率半径 R 与毛细管半径 r 的关系如下: $R = r / \cos \theta$. 附加压力 Δp 可表示为: $\Delta p = -(2T_s / r) \cdot \cos \theta$; 非饱和土中水-气交界面上产生的压降可以用下式来表示:

$$u_a - u_w = \frac{2T_s \cos \theta}{r} \quad (8)$$

式(8)即为毛细作用力的理论计算公式, 该公式的核心变量为气液表面张力、固液接触角和土体毛细孔径. 影响表面张力的因素有很多, 比如温度和压力等, 温度与表面张力之间近似满足线性关系, 表面张力随着压力的增加而减小, 当温度恒定时, 可以确定气液交界面的表面张力. 土体中的毛细孔径并不是均匀的, 毛细孔径的大小、分布及形状在不同类型的土体中会表现出不同的形态, 目前, 可以通过试验获得土体的平均孔径分布^[19].

相比较与较容易确定的表面张力和孔径, 土颗粒与水之间的接触角的确定就显得较为困难. 接触角为水-气交界面上的切线与水-固交界面上直线之间的夹角, 是相互接触的物质相的固有属性,

可以用 Young 方程表示. 土颗粒与水通常为亲润性接触角, Kumar^[20] (1990) 报道砂土中的接触角可达 65° . 在非饱和土中, 水-气交界面的几何形状、土颗粒的几何形状和土-水的接触角是控制三相之间作用力的 3 个主要因素^[21]. 表面粗糙程度、表面材料的组成和温度对接触角均有直接或间接的影响^[22]. 接触角的另一特性便是其在吸湿和脱湿过程中所表现出的滞后性^[23,24], 即, 吸湿过程的固-液接触角大于脱水过程中的接触角, Letey 等 (1962) 和 Laroussi 等 (1979) 报道砂土在吸湿过程中的接触角可以达到 $60\sim 80^\circ$, 而脱湿接触角仅为 $0\sim 30^\circ$. 上述原因致使固液接触角难以确定, 现有办法所测出来的土-水的接触角通常只是具有相对意义的表观接触角^[25]. 因此, 在实际应用中很难通过式 (8) 准确测定非饱和土中的吸力.

3.3 吸附-毛细作用力

土体的吸力是由许多物理和物理化学作用所产生的, 这些因素各自所起的相对作用的大小取决于非饱和土的含水量, 即孔隙水的赋存形态. 在较低含水量和相应较高吸力值的非饱和土中, 孔隙水主要以结合水附着于土颗粒表面, 此时吸力以吸附作用力为主, 结合水与土颗粒之间的吸附作用力可以通过等温吸附试验并结合式 (4) 来确定. 当非饱和土处于较高含水量和相应较低吸力值时, 孔隙水主要以毛细水形式存在. 毛细作用力可以通过式 (8) 并结合试验来确定.

作为受控于吸附作用的高吸力区与受控于毛细作用的低吸力区两者之间的吸附-毛细作用区的情况与土体的类型有直接关系, 包括土的孔隙大小分布、土颗粒大小分布、有机质含量和粘土含量等. 粘土由于其土颗粒表面积较大, 需要更多的水分来满足高吸力区的水合作用; 砂土在初始的颗粒表面发生水合作用时吸收的水分很少, 大部分非饱和含水量以毛细作用为主. 鉴于吸附毛细作用力是吸附作用力和毛细作用力的过渡作用力, 当土体中的孔隙水接近结合水状态时, 吸附毛细作用力接近吸附作用力; 当土体中的孔隙水接近毛细水连通状态时, 吸附毛细作用力接近毛细作用力.

由此可见, 当非饱和土中的含水量不能维持毛细水连通时, 非饱和土中的吸力难以准确确定且具有很强的特殊性. 由于吸附毛细作用力的复杂性和特殊性, 当学者们通过轴平移技术量测或控制非饱和土中的吸力时, 往往在含水量较低的土体中存在较大的误差. 而轴平移技术的核心部件为

以陶瓷板为代表的高进气值材料, 下文中将重点分析高进气材料量测吸力的适用性.

4 高进气值材料量测吸力的适用性分析

高进气值材料的孔径微小而且分布均匀, 当被水饱和后, 孔隙的气液交界面产生表面张力, 表面张力把气相和液相隔绝开, 使得高进气值材料两侧的气相和液相存在压差. 陶土板为最常用的高进气值材料, 陶瓷板的孔径越小, 饱和渗透系数也越小, 相应的进气压力值越大. 陶土板上方的气压与陶土板内部以及陶土板下方液压之间存在的最大压差同样可用 Young-Laplace 方程表达. 陶土板量测基质吸力的原理可以用图 4 表示. 气压 u_a 和水压 u_w 可以通过容器上部 and 下部端口独立控制, 陶瓷板的进气压力值用 u_{wa} 来表示, 并假设陶瓷板与容器壁紧密接触.

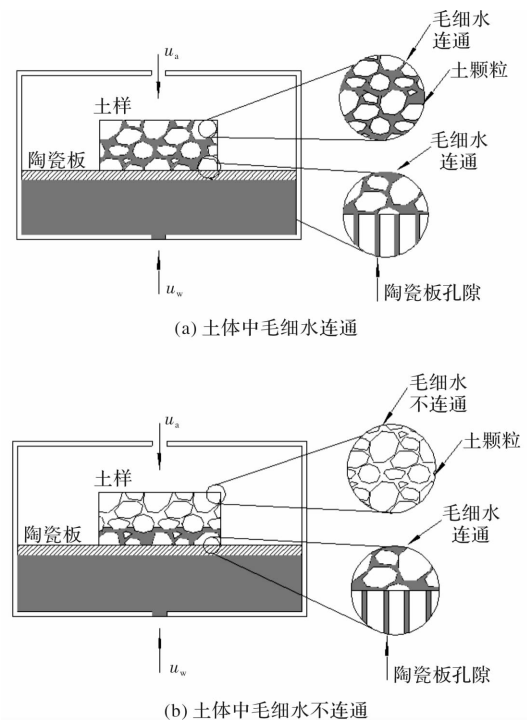


图 4 气体-水-陶瓷板-土体量测系统

Fig. 4 Measuring system of gas-water-high air entry material-soil

该系统在量测非饱和土基质吸力时依赖于两个交界面的平衡: 陶瓷板孔隙中的水-气交界面与土孔隙中的水-气交界面的平衡, 二者之间是否能够达到平衡是保证吸力准确量测的关键性因素. 陶瓷板量测吸力的原理是通过陶瓷板孔隙中水气交界面的表面张力来表征土体中水气交界面的表面张力. 当土体中的毛细水处于连通状态时 (图 4 (a)), 陶瓷板孔隙中的水与土体孔隙中水可以保持

连通状态,此时便可以通过气体-水-陶瓷板-土体系统来量测陶瓷板中水气交界面的表面张力来表征土体孔隙中水气界面的张力.图4(b)表示的是土体中毛细水未联通,当通过气体-水-陶瓷板-土体系统量测土中吸力时,土样底部与陶瓷板接触并被湿润,土样底部因为被湿润而有可能处于连通状态,但是土样上部毛细水并不联通,因此难以与陶瓷板中的水气交界面建立平衡关系.此时,仍通过气体-水-陶瓷板系统所量测的吸力并无实质意义.

为了更好地解释气体-水-高进气值材料系统在量测基质吸力时要求土体中毛细水处于连通状态,将理想的高进气值材料的特征曲线和典型的粗粒土的土-水特征曲线绘制于图5.从图5可以看到,理想的高进气材料的特征曲线相比较与土体的土水特征曲线较为简单.图5中的A点为土体的饱和含水量 θ_s ,B点为土体的进气值含水量 θ_a ;随着土体含水量的不断减小,当达到C点时,土体中的基质吸力便与高进气值材料进气时的吸力相等,D点为土体的残余含水量 θ_r .当土体的含水量减小到C点时,土体中的基质吸力与高进气值材料进气值相等,有理由认为,此时土体所对应的含水量为量测系统所能量测的含水量的下限,也可以将该含水量作为维持非饱和土中毛细水连通所需含水量的下限 θ_c .图5同样表明了,只有当土体中的毛细水处于连通状态时,通过气体-水-高进气值材料系统量测得到的非饱和土的基质吸力才是真实且有意义的.

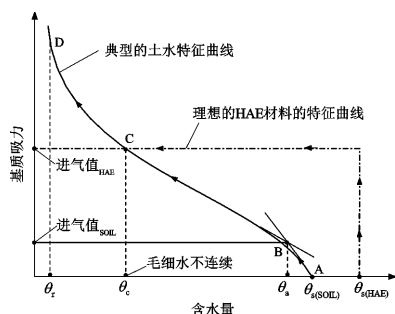


图5 理想的高进气值材料与典型粗粒土的特征曲线

Fig.5 Characteristic curve of typical coarse grained soil and ideal HAE material

5 结论

以孔隙水的赋存状态作为切入点,对孔隙水和相应的吸力进行了分类,并对吸力的量测方法做了分析,主要结论如下:

(1)非饱和土中孔隙水的赋存状态可分为结合水状态、毛细角边水状态和毛细水连通状态,对应于孔隙水的3种赋存状态,非饱和土中的吸力可分为吸附作用力、吸附-毛细作用力和毛细作用力.

(2)吸附作用力可通过等温吸附试验确定,其试验原理和试验结果均较为明确.

(3)吸附-毛细作用力尚难以通过理论计算或试验获得准确的结果,该吸力在数值上介于吸附作用力和毛细作用力之间.

(4)毛细作用力的计算原理虽较为明确,由于参数取值的困难致使难以通过理论计算获得准确的结果,但可通过高进气值材料测量.高进气材料较为适合量测毛细作用力,对高进气值材料不恰当的使用是造成土水特征曲线在低含水量段迅速上扬的主要原因.

参考文献 References

- [1] FREDLUND D G, RAHARDJO H. Soil mechanics for unsaturated soils[M]. New York: John Wiley and Sons, 1993.
- [2] LU N, LIKOS W J. Unsaturated soil mechanics[M]. New York: John Wiley and Sons, 2004.
- [3] EDLEFSEN N E, Anderson A B C. Thermodynamics of soil moisture[M]. Oakland: University of California, 1943.
- [4] BISHOP A W, ALPAN I, BLIGHT G E, et al. Factors controlling the strength of partly saturated cohesive soils[C]// ASCE Research Conference On Shear Strength of Cohesive Soil. Boulder: University of Colorado, 1960: 503-532.
- [5] FREDLUND D G, MORGENSTERN N R, WIDGER R A. The shear strength of unsaturated soils[J]. Canadian Geotechnical Journal, 1978, 15(3): 313-321.
- [6] 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 Zhujiang. Generalized suction and unified deformation theory for unsaturated soils [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 1996, 18(2): 1-9.
- [7] 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 Liansheng, WANG Sijing. Absorbed suction and principle of effective stress in unsaturated soils [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2000, 22(1): 83-88.
- [8] 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 Liansheng. New suggestion on shear strength

- in unsaturated soil based on suction between grains [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2001, 23(4): 412-417.
- [9] 栾茂田, 李顺群, 杨庆. 非饱和土的理论土-水特征曲线[J]. 岩土工程学报, 2005, 27(6): 611-615.
LUAN Maotian, LI Shunqun, YANG Qing. Theoretical soil-water characteristic curve for unsaturated soils [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2005, 27(6): 611-615.
- [10] 耿慧辉, 吴俊阳, 单仁亮, 等. 非饱和土强度的吸力贡献形式研究[J]. 岩土工程学报, 2012, 34(9): 1598-1603.
GENG Huihui, WU Junyang, SHAN Renliang, et al. Contributions of matric suction to strength of unsaturated soil [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2012, 34(9): 1598-1603.
- [11] 李广信, 张丙印, 于玉贞. 土力学[M]. 第二版. 北京: 清华大学出版社, 2013.
LI Guangxin, ZHANG Binyin, YU Yuzhen. Soil mechanics [M]. 2nd ed. Beijing: Tsinghua University Press, 2013.
- [12] 王铁行, 李彦龙, 苏立君. 黄土表面吸附结合水的类型和界限划分[J]. 岩土工程学报, 2014, 36(5): 942-948.
WANG Tiehang, LI Yanlong, SU Lijun. Types and boundaries of bound water on loess particle surface [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2014, 36(5): 942-948.
- [13] LI Yanlong, WANG Tiehang, SU Lijun. Determination of bound water content of loess soil by isothermal adsorption and thermogravimetric analysis [J]. Soil Science, 2015, 180(3): 90-96.
- [14] BARDEN L. Consolidation of compacted and unsaturated clay [J]. Geotechnique, 1965, 15(3): 267-286.
- [15] 李萍, 李同录, 王阿丹, 等. 黄土中水分迁移规律现场试验研究[J]. 岩土力学, 2013, 34(5): 1331-1339.
LI Ping, LI Tonglu, WANG Adan, et al. In-situ test research on regularities of water migration in loess [J]. Rock and Soil Mechanics, 2013, 34(5): 1331-1339.
- [16] 陈正汉. 非饱和土与特殊土力学的基本理论研究[J]. 岩土工程学报, 2014, 36(2): 201-272.
CHEN Zhenghan. On basic theories of unsaturated soils and special soils [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2014, 36(2): 201-272.
- [17] 刘小文, 常立君, 胡小荣. 非饱和红土基质吸力与含水率及密度关系试验研究[J]. 岩土力学, 2009, 30(11): 3302-3306.
LIU Xiaowen, CHANG Lijun, HU Xiaorong. Experimental research of matric suction with water content and dry density of unsaturated laterite [J]. Rock and Soil Mechanics, 2009, 30(11): 3302-3306.
- [18] 张鹏程, 汤连生, 姜力群, 等. 基质吸力与含水量及干密度定量关系研究[J]. 岩石力学与工程, 2013, 32(z1): 2792-2797.
ZHANG Pengcheng, TANG Liansheng, JIANG Liqun, et al. Research of quantitative relations of matric suction with water content and dry density [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2013, 32(z1): 2792-2797.
- [19] 曾召田, 吕海波, 赵艳林, 等. 膨胀土干湿循环过程孔径分布试验研究及其应用[J]. 岩土力学, 2013, 34(2): 322-328.
ZENG Zhaotian, LÜ Haibo, ZHAO Yanlin, et al. Study of pore size distribution of expansive soil during wetting-drying cycle and its application [J]. Rock and Soil Mechanics, 2013, 34(2): 322-328.
- [20] KUMAR S, MALIK R S. Verification of quick capillary rise approach for determining pore geometrical characteristics in soils of varying texture [J]. Soil Science, 1990, 150(6): 883-888.
- [21] DIAZ M E, FUENTES J, CERRO R L. Hysteresis during contact angles measurement [J]. Journal of Colloid and Interface Science, 2010, 343(2): 574-583.
- [22] 杨松, 龚爱民, 吴珺华, 等. 接触角对非饱和土中基质吸力的影响[J]. 岩土力学, 2015, 36(3): 674-678.
YANG Song, GONG Aimin, WU Junhua, et al. Effect of contact angle on matric suction of unsaturated soil [J]. Rock and Soil Mechanics, 2015, 36(3): 674-678.
- [23] LIKOS W J, LU N. Hysteresis of capillary stress in unsaturated granular soil [J]. Journal of Engineering Mechanics-ASCE, 2004, 130(6): 646-655.
- [24] PHAM H Q, FREDLUND D G, BARBOUR S L. A study of hysteresis models for soil-water characteristic curves [J]. Canadian Geotechnical Journal, 2005, 42(6): 1548-1568.
- [25] RAMÍREZ Flores J C, BACHMANN J, MARMUR A. Direct determination of contact angles of model soils in comparison with wettability characterization by capillary rise [J]. Journal of Hydrology, 2010, 382(1): 10-19.

(编辑 吴海西 沈 波)