

非饱和土湿吸力与含水率的定量关系研究

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, 广东 广州 510275; 2. 广州市城市规划勘测设计研究院, 广东 广州 510060;
3. 中山大学地球科学系, 广东 广州 510275)

摘要: 以立方松散堆积方式为例, 从理论上推导并给出了湿吸力与非饱和土含水率的定量关系表达式, 开展了不同含水率状态下重塑细粒砂性土的吸力测试, 对试验结果进行了曲线拟合和分析, 理论计算和试验拟合结果均表明: 对于特定的非饱和土, 湿吸力随含率先增大而后减小, 即存在确定的界限含水率。这与“在一定的土体含水率变化范围内, 非饱和土, 尤其是非饱和砂性土的强度随含水率的增加而先增大后减小”的事实完全相符, 这再次证明了湿吸力, 而非基质吸力, 才是非饱和土有效应力的重要组成部分。

关键词: 非饱和土; 湿吸力; 含水率; 有效应力

中图分类号: TU411 文献标识码: A 文章编号: 1000-4548(2012)08-1453-05

作者简介: 张鹏程(1975-), 男, 博士研究生, 主要从事岩土力学、非饱和土等方面的研究。E-mail: guangzhou2000@126.com。

Quantitative relationship between wet suction and water content of unsaturated soils

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

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

Abstract: Based on the example of cubic loose accumulation, a quantitative relation expression is deduced theoretically between wet suction and water content of unsaturated soils. The suction tests on remodeling fine grain sand soil with different water content are carried out, and a curve-fitting of the test results is analyzed. Theoretical calculations and experimental results show that for specific unsaturated soils, with the increase of the water content, the suction wet increases first and then decreases, which is the same as that when there is a certain boundary of water content. This agrees with the fact that in a certain range, the strength of the unsaturated soils, especially the unsaturated sand soils, increases first and then decreases with the increase of the water content. It indicates that the wet suction, instead of matrix suction, is the important part of effective stress.

Key words: unsaturated soils; wet suction; water content; effective stress

1 湿吸力与非饱和土的有效应力

文献[1~3]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等的详细研究, 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: ①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; ②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。并由此提出了湿吸力 S_a 、结构吸

力 S_s 的概念。基于湿吸力和结构吸力概念基础上的非饱和土有效应力原理, 分别明确了 A. W. Bishop 单应力状态变量中的参数 χ 和 D. G. Fredlund 双应力状态变量中的 $\tan\phi^b$ 的物理意义, 其概念清晰, 物理意义明确, 逐渐为国内的众多学者^[4-6]所接受。

因此, 湿吸力而非基质吸力, 才是非饱和土有效应力的一部分, 初步研究的结果表明^[1]: 湿吸力与非

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

收稿日期: 2011-06-28

*通讯作者

饱和土的饱和角、气、液交界面处的接触角、密度、颗粒组成排列等有关。考虑到实际工程应用中含水率与非饱和土的强度密切相关，在文献[1~3]研究成果的基础上，进一步探讨了湿吸力与含水率的定量关系，并开展了不同含水率下重塑细粒砂性土的试验研究。

2 湿吸力与含水率的定量关系

2.1 湿吸力与饱和角的定量关系

湿吸力分为微观状态的湿吸力 P_s 和宏观状态的湿吸力 S_a ，微观状态的湿吸力是指微观上两土颗粒之间有毛细水作用处的湿吸力，而宏观状态的湿吸力 S_a 则是指在一典型单元体中将 P_s 平均到一单位面积上所得到的平均湿吸力^[1]。显然，宏观状态的湿吸力 S_a 对应实际土体，与非饱和土的强度直接相关。

图 1 为球形颗粒与弯液面的几何关系示意图，设土颗粒半径为 R ，接触角为 θ ，饱和角为 φ ，微观状态的湿吸力为 P_s ，宏观状态的湿吸力为 S_a ， P_c 为基质吸力，水的表面张力系数为 σ ，根据文献[1]有：

$$2\pi r \cdot 2hp_c = 2 \cdot 2\pi r \sigma \cos(\theta + \varphi) \quad (1)$$

即
$$p_c = (\sigma / R) \cos(\theta + \varphi) / (1 - \cos \varphi) \quad (2)$$

$$\pi r^2 p_s = 2\pi r \sigma \sin(\theta + \varphi) \quad (3)$$

即
$$p_s = (2\sigma / R) \sin(\theta + \varphi) / \sin \varphi \quad (4)$$

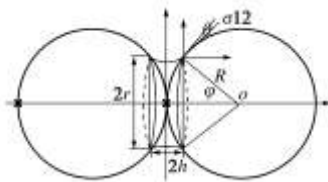


图 1 球形颗粒与弯液面的几何关系

Fig. 1 Geometric relationship between spherical particles and meniscus

联合式 (2)、(4) 得

$$p_s = 2p_c (1 - \cos \varphi) \tan(\theta + \varphi) / \sin \varphi \quad (5)$$

以立方松散堆积为例^[1]，将 P_s 在其作用的单位面积上进行平均，得到宏观状态的湿吸力 S_a ：

$$4\pi R^2 \cdot S_a = p_s \cdot 2\pi R \cdot (R - R \cos \varphi) \quad (6)$$

即
$$S_a = (1/2)(1 - \cos \varphi) p_s \quad (7)$$

由式 (4)、(7) 得

$$S_a = (\sigma / R) \sin(\theta + \varphi)(1 - \cos \varphi) / \sin \varphi \quad (8)$$

当接触角 θ 为常量时，对于给定的土颗粒半径 R ，湿吸力与饱和角 φ 存在着定量关系。由于饱和角 φ 是一微观状态描述量，不易量测，因此有必要进一步研究非饱和土的含水率与饱和角的定量关系。

2.2 含水率与饱和角的定量关系

如图 1 所示，两土颗粒间孔隙水的体积 V 等于底面半径为 r ，侧面高为 $2h$ 的圆柱体的体积 V_1 减去两个球缺的体积 $2V_2$ ：

$$V_1 = \pi r^2 \cdot 2h \quad (9)$$

$$2V_2 = 2 \cdot \pi h^2 (R - h/3) \quad (10)$$

$$V = 6\pi R^3 (1 - \cos \varphi)^2 (2 \cos \varphi + 1) \quad (11)$$

取土粒相对密度为 2.7 g/cm^3 ，水的密度为 1.0 g/cm^3 ，对于一个典型立方松散堆积的立方体单元内，共有 8 个土颗粒、每个土颗粒体积的 $1/8$ 被切到该单元体内，弯液面水体类似，因此，土体含水率 w 为

$$w = 1.0 \cdot V / 2.7 \cdot (4\pi R^3 / 3) \quad (12)$$

即
$$w = 5(1 - \cos \varphi)^2 (\cos \varphi + 0.5) \quad (13)$$

式 (13) 为立方松散堆积下等粒径颗粒含水率与饱和角的定量关系表达式。

2.3 湿吸力与含水率的定量关系

取水的表面张力系数 σ 为 $73 \times 10^{-3} \text{ N/m}$ ，联合式 (2)、(8)、(13)，即可分别得到非饱和土基质吸力、湿吸力和含水率的定量关系。表 1 为土颗粒半径 $R=0.1 \text{ mm}$ （按《土的分类标准》(GBJ145—90)，为砂粒)、接触角 θ 分别为 5° ， 10° ， 15° 时，湿吸力、基质吸力和饱和角、含水率的大小关系，如表 1 所示。

将上述计算结果在 EXCEL 中进行多项式拟合，分别得到湿吸力、基质吸力和含水率的计算拟合关系曲线，如图 2，3 所示。

表 1 湿吸力、基质吸力与饱和角、含水率定量关系

Table 1 Quantitative relationship between wet suction, suction and saturation angle, water content

饱和角 $\varphi(^{\circ})$	含水率 $w/\%$	$\theta = 5^{\circ}$		$\theta = 10^{\circ}$		$\theta = 15^{\circ}$	
		S_a/Pa	P_c/Pa	S_a/Pa	P_c/Pa	S_a/Pa	P_c/Pa
5	0.007	2.8	188923.2	5.60	185300.9	8.3	180268.4
10	0.114	5.8	46413.5	11.30	45153.0	16.7	43548.8
15	0.567	8.8	20131.8	17.10	19416.6	25.3	18553.6
20	1.745	12.0	10970.5	23.10	10482.9	34.1	9915.6
25	4.115	15.3	6747.6	29.30	6382.4	43.1	5968.6
30	8.173	18.8	4463.4	35.70	4174.0	52.4	3852.9
35	14.381	22.5	3092.2	42.40	2854.3	61.9	2594.6
40	23.099	26.4	2206.4	49.30	2005.7	71.9	1789.7
45	34.518	30.5	1602.1	56.56	1429.6	82.3	1246.2

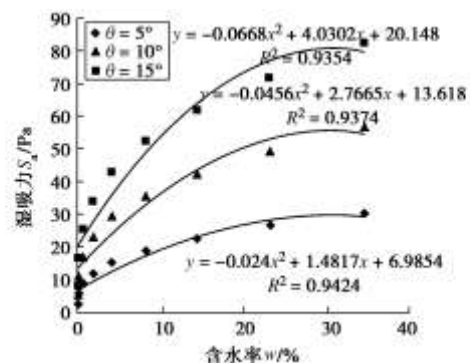


图 2 湿吸力和含水率的计算拟合关系曲线

Fig. 2 Fitting curves of calculated wet suctions and water contents

当接触角分别为 5° ， 10° ， 15° 时， S_a 对应的二次多项式函数关系 (S_a^5 ， S_a^{10} ， S_a^{15} 分别为相应接触角时的湿吸力大小) 如下：

$$S_a^5 = -0.024w^2 + 1.4817w + 6.9854 \quad (14)$$

$$S_a^{10} = -0.0456w^2 + 2.7665w + 13.618 \quad (15)$$

$$S_a^{15} = -0.00668w^2 + 40.3.2w + 20.148 \quad (16)$$

分别对式 (14) ~ (16) 求导数:

$$dS_a^5 = -0.048w + 1.4817 \quad (17)$$

$$dS_a^{10} = -0.0912w + 2.7665 \quad (18)$$

$$dS_a^{15} = -0.1336w + 4.0302 \quad (19)$$

令 $dS_a^5, dS_a^{10}, dS_a^{15}$ 分别等于 0, 则有 $w_5=30.9, w_{10}=30.3, w_{15}=30.2$ 。

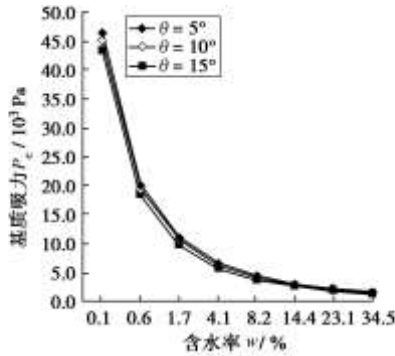


图 3 基质吸力和含水率的计算拟合关系曲线

Fig. 3 Fitting curves of calculated suctions and water contents

将 w_5, w_{10}, w_{15} 的值定义为界限含水率 w_{max} , 当土体的含水率 w 小于 w_{max} 时, 随着含水率的逐渐增加, 湿吸力逐渐增大, 当土体的含水率 w 大于 w_{max} 时, 随着含水率的逐渐增加, 湿吸力却逐渐减小。将 w_5, w_{10}, w_{15} 分别代入式 (13), 当接触角不同时, 得到各自的界限饱和角 ϕ_{max} 分别为 $\phi_5=43.6, \phi_{10}=43.3, \phi_{15}=43.2$ 。

通过上述分析并结合图 2, 可以得出如下结论: ① 相同的含水率, 湿吸力随接触角的增大而增大, 随接触角的减小而减小; ② 相同的接触角, 在土体的含水率 w 小于 w_{max} 时, 湿吸力随含水率的增大而增大, 在土体的含水率 w 大于 w_{max} 时, 随含水率的增大而减小; ③ 相同的接触角, 存在界限饱和角 ϕ_{max} , 在饱和角 ϕ 小于 ϕ_{max} 时, 湿吸力随饱和角的增大而增大, 在饱和角 ϕ 大于 ϕ_{max} 时, 随饱和角的增大而减小, 这与文献 [1] 中理论上给出的研究成果完全一致; ④ 湿吸力与含水率基本满足二次多项式曲线关系, 回归系数均大于 0.93 以上, 相关度较高。

2.4 湿吸力与基质吸力比较

对比图 2, 3 可看出湿吸力、基质吸力与含水率的关系明显不同: ① 随含水率的不断增加, 湿吸力先增加, 达到峰值后, 又逐渐减小, 即存在最优含水率, 湿吸力为最大值; 而基质吸力随含水率的增加, 单调递减。② 相同含水率状态下, 基质吸力的值大于湿吸力。

图 3 所示曲线再次证明了基质吸力的本质是指土体吸水能力—基质势的大小: 当土体干燥时, 土体吸水能力最大, 基质势最大, 即基质吸力最大, 随着含水率的逐渐增加直至土体饱和时, 土的吸水能力逐渐减小, 基质势减小, 对应的基质吸力也逐渐减小。如

果将基质吸力作为非饱和土有效应力的一部分, 那么就意味着当土体干燥、含水率很低甚至为 0 时, 非饱和土的强度应该为无穷大, 事实并非如此, 干燥的砂土, 虽然其吸水的能力 (基质吸力) 很大, 但其对应的强度并不大。这也解释了为什么 A. W. Bishop 单应力变量理论和 D. G. Fredlund 的双应力变量理论应用于非饱和土有效应力原理和强度理论中不成功的根本原因——将基质吸力作为非饱和土有效应力一部分。

与基质吸力比较, 湿吸力被定义为土颗粒因水分湿润而使土颗粒之间产生的吸力, 其强调的是土颗粒与颗粒之间的作用力, 与基质吸力的概念存在着本质的区别。利用上述湿吸力与含水率的曲线关系, 可以较好地解释非饱和土强度与含水率的关系。对于非黏性土, 当砂土很干时, 砂土的强度很小, 随着含水率的增加, 由于土颗粒间水膜的“吸附”作用, 砂土的强度逐渐变大, 但当含水率继续增加时, 土颗粒间水膜的“吸附”作用逐渐减小, 直至失去, 此时砂土的强度又逐渐变小。对于黏性土, 在含水率很低时, 其强度很大的原因是由于结构吸力的作用, 如果抛开结构吸力的影响, 此时土体中的湿吸力仍然符合上述关系, 即存在最优含水率, 在含水率低于该最优含水率时, 随着含水率的增加, 湿吸力逐渐增加, 当含水率大于该最优含水率时, 随着含水率的增加, 湿吸力逐渐减小。这再次证明了, 湿吸力是非饱和土有效应力的一部分。

3 对比分析

3.1 实验验证的理论依据

虽然基质吸力不是非饱和土有效应力的一部分^[1-3], 但基质吸力与表面张力及表面曲率半径之间关系的研究比较成熟: 文献 [7, 8] 基于弯曲表面内外压差的 Young-Laplace 公式和弯曲表面蒸气压变化的 Kelvin 公式, 经过审慎的理论推导和实验验证, 建立了通过测定试验土样的相对湿度, 即可直接测算基质吸力的理论基础。因此, 本文在实验方法上借鉴该文的方法, 此处只作简单的说明。

Young-Laplace 公式表述了曲面内外压差与表面张力及表面曲率半径 r 之间的关系。

$$p_c = 2\sigma / r \quad (20)$$

Kelvin 公式表述了一定温度下弯曲液面的蒸气压变化与弯液面的曲率、表面能及液体克分子体积的关系:

$$RT \ln(p / p^0) = 2\sigma \cdot V / r \quad (21)$$

式中, R 为摩尔气体常数, T 为绝对温度, P 为 T 温度下弯液面的蒸气压, p^0 为 T 温度下平液面的蒸气压, V 为液体克分子体积。

联合式 (20)、(21) 得

$$(RT/V)\ln(p/p^0) = p_c \quad (22)$$

将液体克分子体积V换算成由水的克分子量 M_w 和水的密度 ρ_w 来表达,得

$$(RT\rho_w/M_w)\ln(p/p^0) = p_c \quad (23)$$

此外,联合式(5)、(7)得

$$S_a = (1 - \cos\varphi)^2 \tan(\theta + \varphi) p_c / \sin\varphi \quad (24)$$

为了建立湿吸力与相对湿度的关系,将式(23)

代入式(24)得

$$S_a = [(1 - \cos\varphi)^2 \tan(\theta + \varphi) / \sin\varphi \cdot (RT\rho_w/M_w)\ln(p/p^0)] \quad (25)$$

根据式(13)建立的非饱和土含水率和饱和角的近似定量关系,并联合式(25)得

$$S_a = f(w, \theta)(RT\rho_w/M_w)\ln(p/p^0) \quad (26)$$

对于给定的非饱和土体,在温度一定的情况下,式中的接触角 θ 、摩尔气体常数 $R(8.314 \text{ J mol}^{-1} \text{ K}^{-1})$ 、水密度 ρ_w 、水的克分子量 $M_w(18.016 \text{ g/mol})$ 都是常数;因此,对于给定含水率 w 的非饱和土,代入式(13)可近似求得饱和角 φ ,然后代入式(25),同时根据试验测得的相对湿度 p/p^0 ,即可得到不同接触角 θ 时的湿吸力大小。

3.2 实验方法与结果

试验原状土样采自广州市某基坑,其基本物理性质参数:土样定名为细砂;不均匀系数 $C_u=2.04$,曲率系数 $C_c=0.82$,土粒相对密度=2.70,初始含水率=24.6%;颗粒组成粗砂(2~0.5 mm)占5.1%,中砂(0.5~0.25 mm)占11.6%,细砂(0.25~0.075 mm)占73.4%,细砂(<0.075 mm)占9.9%。将原土晾干、碾碎、过0.1 mm筛,依设计含水率 $w=2\%$, 4%, 8%, 14%, 23%, 35%分别配置了散状土样,用两层塑料袋封装土样,并置于恒温保湿箱内以使袋内水分充分运移、混合均匀,最后实测含水率分别为 $w=1.9\%$, 4.2%, 7.9%, 14.3%, 22.3%, 34.8%。

采用SHINYEI温湿度计量测土样中的温度和相对湿度,该设备操作简单,性能可靠,可实现全程跟踪记录,记录时间长,集数据采集、记录于一体,具有断电后历史数据自动存储保护功能。操作步骤简单介绍如下:①用随机附带的通讯电缆将记录仪与计算机(PC586以上即可)的串行口相连接;②在计算机上运行记录仪应用程序,设置好记录仪的记录启动时间、记录周期、停止时间、停止方式等参数;③设定完成后脱开记录仪与计算机的连接,将记录仪的探头置于需检测的土样中;④检测完毕后,再将记录仪与计算机连接,运行记录仪应用程序,将记录数据下载到计算机内进行数据处理。将含水率及相对湿度等测试结果代入式(25),计算的湿吸力结果见表2。

将上述计算结果在EXCEL中进行多项式拟合,得

到湿吸力和含水率的试验拟合关系曲线,如图4所示。

3.3 实验结果的分析与讨论

由图4可知,当接触角分别为 5° , 10° , 15° 时,其对应的二次多项式函数关系(S'_5 , S'_{10} , S'_{15} 分别为相应接触角时的湿吸力大小)如下:

$$S'_5 = -0.0692w^2 + 3.9853w + 31.098 \quad (27)$$

$$S'_{10} = -0.0609w^2 + 3.4199w + 25.582 \quad (28)$$

$$S'_{15} = -0.0535w^2 + 2.9678w + 20.514 \quad (29)$$

分别对式(27)~(29)求导数:

$$dS'_5 = -0.1384w + 3.9853 \quad (30)$$

$$dS'_{10} = -0.1218w + 3.4199 \quad (31)$$

$$dS'_{15} = -0.107w + 2.9678 \quad (32)$$

令 dS'_5 , dS'_{10} , dS'_{15} 分别等于0,则有 $w'_5=28.8$, $w'_{10}=28.1$, $w'_{15}=27.7$ 。

表2 湿吸力计算结果表

Table 2 Results of wet suction

w / %	Φ / (°)	t / °C	p/p ⁰	S _a /Pa		
				$\theta=5^\circ$	$\theta=10^\circ$	$\theta=15^\circ$
1.9	20.45	25.2	96.9	23.39	28.89	34.99
4.2	25.15	25.4	98.2	30.65	37.15	44.51
7.9	29.73	25.1	98.6	46.86	56.18	66.96
14.3	34.95	25.5	99.2	52.48	62.55	74.54
22.3	39.60	25.3	99.5	56.08	66.82	80.02
34.8	45.11	25.3	99.7	60.32	72.30	87.72

注:根据《常用化学数据手册》,温度 25.1° , 25.2° , 25.3° , 25.4° , 25.5° 下水的密度分别为997.018, 996.992, 996.966, 996.940, 996.914 kg/m³。

对比表1的计算结果与表2的实验结果、图2的计算关系曲线与图4的试验关系曲线,分析及讨论如下:

(1)试验曲线拟合结果和理论计算曲线拟合结果规律极其相似:①湿吸力大小与含水率较好地满足二次多项式拟合关系;②均存在界限含水率;③相同的含水率,湿吸力随接触角的增加而增大。

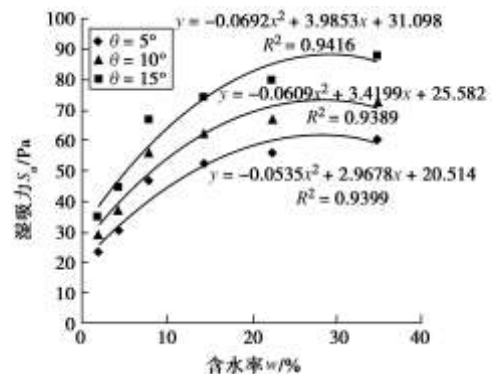


图4 湿吸力和含水率的试验拟合关系曲线

Fig. 4 Fitting curves of test wet suction and water contents

(2)试验拟合和理论计算结果均表明:对于细粒砂性土,存在界限含水率,当含水率逐渐增大并接近界限含水率时,湿吸力逐渐增大,当含水率进一步增大时,湿吸力随含水率的增大而减小。这与实际现实情况相吻合:对于干燥的细粒砂性土体,当逐渐增加

含水率时, 其强度逐渐增大, 而当含水率进一步增加时, 其强度又逐渐减小。这种现象用表征基质吸力和含水率关系的非饱和土土水特征曲线(基质吸力随含水率的增加而单调减小, 当土体含水率为零时, 土体强度最大)显然无法解释。这再次证明了湿吸力才是非饱和土有效应力的一部分, 而A. W. Bishop或D. G. Fredlund等非饱和土强度公式将基质吸力作为非饱和土有效应力一部分是存在问题的。

(3) 根据试验结果拟合出来的界限含水率($w'_{\max} = 28.5$)小于理论计算拟合出的界限含水率($w_{\max} = 43.3$), 这是由于 w_{\max} 是根据理想的四方规则堆积计算出来的, 在四方堆积方式中, 每个孔隙的大小是相同的, 此处不妨称之为“等效孔隙”, 而 w'_{\max} 是由实际土体试验得出的, 在实际土体中, 大颗粒周围被小颗粒“填充”, 与理想堆积方式相比, 存在大量小于“等效孔隙”的小孔隙, 当土体含水率逐渐增加时, 这些小孔隙“优先”被水“侵入”, 因此, 达到相同湿吸力所需要的含水率也较小, 这同时也再次证明了文献[1]中“湿吸力与土颗粒的堆积方式密切相关”的结论。

(4) 相同接触角、相同含水率的条件下, 试验拟合结果的湿吸力大于理论计算结果的湿吸力: 由式(8)不难看出, 湿吸力与土颗粒的半径成反比, 即土颗粒半径愈大, 湿吸力愈小, 土颗粒半径愈小, 湿吸力愈大, 由于理论计算结果是基于所有土颗粒半径为0.1 mm的, 而实际试验的土体中存在比0.1 mm小的土颗粒, 从而导致实际土体的土颗粒“等效半径”小于0.1 mm, 因此, 试验拟合结果的湿吸力偏大。

4 结 语

对非饱和土粒间吸力的正确认识与否, 已成为非饱和土有效应力原理和强度理论研究的难点和重点问题。基质吸力与湿吸力虽然都来源于气、液、固界面的表面张力, 但无论是从二者间的概念区别, 或从有效应力的本质出发, 基质吸力并非饱和土有效应力的组成部分, 这也是A. W. Bishop单应力状态变量或D. G. Fredlund双应力状态变量理论应用到非饱和土强度中不成功的根本原因。研究结果表明: 对于给定的非饱和土, 湿吸力与含水率存在确定的函数关系, 而且存在界限含水率, 当土体含水率小于界限含水率时, 湿吸力随含水率增加而增大, 当土体含水率大于界限含水率时, 湿吸力随含水率增加而减小。该研究结果成功解释了“在一定的土体含水率变化范围内, 非饱和土的强度随含水率的增加而先增大后减小”的事实。本文以立方松散均匀堆积的砂性土为例, 初步研究了湿吸力与含水率的定量关系, 对于不等粒径、任意堆积土体的湿吸力定量计算及试验实测, 有待于进一步的研究。

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. (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 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. (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 Lian-sheng, YAN Bo, ZHANG Peng-cheng, 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] 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 Ding-yi, FENG Zhi-yan. 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))
- [5] 陈敬虞, FREDLAUD. 非饱和土抗剪强度理论的研究进展[J]. 岩土力学, 2003, 24(增刊): 655 - 660. (CHEN Jing-yu, FREDLAUD. Advance in research on shear strength of unsaturated soils[J]. Rock and Soil Mechanics, 2003, 24(S): 655 - 660. (in Chinese))
- [6] 杨庆, 张传庆, 栾茂田. 基于微结构定量分析的非饱和土广义有效应力原理[J]. 大连理工大学学报, 2004, 44(7): 556 - 559. (YANG Qing, ZHANG Chuan-qing, LUAN Mao-tian. Generalized effective stress principle of unsaturated soils based on quantitative analysis of soil microstructure[J]. Journal of Dalian University of Technology, 2004, 44(7): 556 - 559. (in Chinese))
- [7] 熊承仁, 刘宝琛, 张家生. 重塑黏性土的基质吸力与土水分及密度状态的关系[J]. 岩石力学与工程学报, 2005, 24(2): 321 - 327. (XIONG Cheng-ren, LIU Bao-chen, ZHANG Jia-sheng. Relation of matric suction with moisture state and density state of remolded cohesive soil[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2005, 24(2): 321 - 327. (in Chinese))
- [8] 姚海林. 关于基质吸力及几个相关问题的思考[J]. 岩土力学, 2005, 26(1): 67 - 70. (YAO Hai-lin. Considerations of several problems about matric suction[J]. Rock and Soil Mechanics, 2005, 26(1): 67 - 70. (in Chinese))

