

仍有影响,但由于Monte Carlo法独特的搜索模式保证了各节点有足够大的探测空间,所以初始滑面对计算结果的影响并不显著(与非线性优化法相比),这只是定性分析,复杂条件下初始滑面对Monte Carlo法计算结果的影响还需进一步研究。

尽管此法高效稳定,但仍没有完全克服传统非线性优化法存在的不足:①初始滑面位置不同则搜索结果也不相同,而在理论上边模形状及土质参数一旦确定,临界滑面也应唯一确定;②即使针对同一个初始滑面,多次搜索结果也不相同,尽管一般差别不大,但偶尔也会例外,这是由该法的随机性所决定的。实践中只要搜索次数足够多,总能保证搜索到临界滑面。

4 结 论

本文对Venanzlo R. Greco 提出的Monte Carlo法进行了改进,增加一条几何合理性条件(除了滑面两端点,滑面与坡面不能相交),增加了方向控制与变自由度机制。这些措施有效地减少了不满足几何合理性条件的试算滑面,保证了搜索过程的准确、高效、稳定。笔者还将此算法加入到自主研发的边坡稳定分析软件ZSlope中,它可以实时地显示整个搜索过程,这对于及时发现并解决潜在的问题非常有效。

参考文献:

- [1] ARAL K, TAGYO K. Determination of noncircular slip surface giving the minimum factor of safety in slope stability analysis[J]. Soils and Foundations, 1985,25(1):43 - 51.
- [2] CHEN Z Y, SHAO C M. Evaluation of minimum factor of safety in slope stability analysis[J]. Canadian Geotechnical Journal, 1988,25:735 - 748.
- [3] CHEN Z Y. Random trials used in determining global minimum factors of safety of slopes[J]. Canadian Geotechnical Journal, 1992,29:225 - 233.
- [4] VENANZLO R. Greco. Efficient Monte Carlo technique for locating critical slip surface[J]. Journal of Geotechnical Engineering, 1996,122(7): 517 - 525.
- [5] ABDALLAH I, HUSEIN Malkawi, WALEED F, HASSAN Sarada K. Sarma. Global search method for locating general slip surface using Monte Carlo techniques[J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 2001,127(8):688 - 698.
- [6] 张鲁渝.边坡稳定分析软件 ZSlope 的开发[J].岩石力学与工程学报,2004,23(16):2830 - 2835.(ZHANG Lu-yu. The development of software for slope stability analysis[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2004,23(16):2830 - 2835)
- [7] 朱大勇,周早生.边坡全局临界滑动场(GCSF)理论及工程应用[J].土木工程学报,1999,32(3):66 - 72.(ZHU Da-yong, ZHOU Zao-sheng. Theory of globally critical slip field of slopes and its application to practical engineering[J]. China Civil Engineering Journal, 1999,32(3):66 - 72.)
- [8] 张鲁渝.一个用于边坡稳定分析的通用条分法[J].岩石力学与工程学报,2005,24(3):496 - 501.(ZHANG Lu-yu. Generalized limit equilibrium method for slope stability analysis[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2005,24(3):496 - 501.)
- [9] DONALD I B, GIAM P S K. Soil slope stability programs review[C]// ACADS Publication No. U255. Melbourne Australia, 1989.
- [10] ANTHONY T C. Goh. Genetic algorithm search for critical slip surface in multiple-wedge stability analysis[J]. Can Geotech J, 1999,36:382 - 391.
- [11] 朱大勇,姜弘道.边坡临界滑动场方法与应用(II) — 数值模拟[J].水利水电科技进展,2000,20(4):65 - 68.(ZHU Da-yong, JIANG Hong-dao. A method and application for locating critical slip field(II) [J]. Chinese Journal of Technique Advanced for Hydraulic and Hydroelectric Engineering. 2001,38(2): 328 - 337.)
- [12] FREDLUND D G, KRAHN J. Comparison of slope stability methods of analysis[J]. Canadian Geotechnical Journal, 1977,14(3):429 - 439.
- [13] 陈祖煜.土质边坡稳定分析—原理、方法、程序[M].北京:水利水电出版社,2003.(CHEN Zu-yu. The theory and method and program for analysis of stability of soil slope[M]. Beijing: Hydraulic and Hydroelectric Engineering Publisher, 2003.)

非饱和土的基质吸力和张力吸力

栾茂田^{1, 2, 3}, 李顺群^{1, 2, 4}, 杨庆^{1, 2}

(1.大连理工大学海岸和近海工程国家重点实验室, 辽宁 大连 116024; 2.大连理工大学土木水利学院, 辽宁 大连 116024;

3.中国科学院武汉岩土力学研究所, 湖北 武汉 430071; 4.辽宁工学院土木建筑系, 辽宁 锦州 121001)

摘要:首先在既往关于非饱和土分类方法的基础上, 根据孔隙水弯液面与土颗粒表面的搭接状态, 将双开敞非饱和土进一步细分为搭接双开敞非饱和土和不搭接双开敞非饱和土。然后基于热力学原理, 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。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, 同时利用作者们所提出的等效吸力概念, 对比了由基质吸力、张力吸力所产生的等效吸力, 从而一方面揭示了张力吸力在非饱和土力学中的重要性, 另一方面论证了等效吸力概念的科学性与实用性。

关键词:非饱和土; 表面张力; 饱和半径; 张力吸力; 合吸力; 等效吸力

中图分类号: TU43

文献标识码: A

文章编号: 1000-4548(2006)07-0863-06

作者简介:栾茂田(1962-), 男, 博士, 教授, 博士生导师, 主要从事海洋土力学理论与实验技术、岩土力学基本理论与数值分析、非线性动力学与岩土地震工程等方面的科研和教学工作。

Matric suction and tension suction of unsaturated soils

LUAN Mao-tian^{1,2,3}, LI Shun-qun^{1,2,4}, YANG Qing^{1,2}

(1. State Key Laboratory of Coastal and Offshore Engineering, Dalian University of Technology, Dalian 116024, China; 2. School of Civil

and Hydraulic Engineering, Dalian University of Technology, Dalian 116024, China; 3. Institute of Rock and Soil Mechanics, Chinese

Academy of Sciences, Wuhan 430071, China; 4. Department of Civil Engineering, Liaoning Institute of Technology, Jinzhou 121001, China)

Abstract: Based on conventional classification system for unsaturated soils, the double-open unsaturated soil was further divided into the overlapped double-open unsaturated soil and non-overlapped double-open unsaturated soil according to the contact state of meniscus of pore water with the surface of the soil particles. Furthermore, the tension suction, which was closely related with but rather different from the matric suction, was presented on the basis of thermodynamics. Theoretical analysis on quantitative relation between matric suction and tension suction in unsaturated soils with isolated pore water was made. The equivalent suctions respectively corresponding to matric suction and tension suction were determined and compared by using the concept of equivalent suction given by the authors. Through the comparative study, the importance and essence of the tension suction in unsaturated soil mechanics was clearly displayed and the rationality of the concept of equivalent suction was illustrated.

Key words: unsaturated soil; surface tension; radius of saturation; tension suction; total suction; equivalent suction

0 前言

非饱和土的工程特性强烈地依赖于其含水率或饱和度。由于饱和度在一定程度上与基质吸力有关, 而且基质吸力比较直观, 且可以通过试验测得。因此一般认为非饱和土的强度依赖于基质吸力^[1]。

沈珠江将非饱和土中除正应力所引起的抗剪强度之外的所有能提高强度的因素统称为广义吸力^[2], 并将广义吸力分为毛管吸力和结构吸力两部分。基于表面张力的影响, 汤连生提出了湿吸力的概念, 同时认为作用于非饱和土土颗粒并对颗粒间相互作用有贡献的吸力包括本征结构吸力、可变结构吸力、有效基质

吸力、湿吸力和牵引力等五类吸力^[3]。为了与目前为大家普遍所接受的基质吸力概念保持一致, 这里不拟提出与基质吸力概念相交叉或相互包涵的吸力概念, 也不涉及由含水率变化引起的诸如双电层、渗透吸力、电磁力、盐分胶结力等变化作用, 将由等直径球形颗粒所组成的最松散堆积体理想模型作为研究对象, 且

基金项目:国家自然科学基金资助项目(50179006); 教育部跨世纪优秀人才培养计划基金资助项目(教技函[1999]2号); 辽宁省教育厅科学研究计划资助(2004F105)

收稿日期: 2005-04-04

不考虑重力对环状水形状的影响, 探讨非饱和土的分类及其吸力效应。

1 非饱和土的分类

1.1 非饱和土的现有分类方法

依据不同研究目的, 采用的非饱和土分类方法也不同。黄文熙等^[4]阐述的下述分类方法应用较为广泛。

(1) 水封闭非饱和土: 土在饱和度较低时, 大部分水以环状形式存在于土颗粒接触点周围, 少量水以结合水形式包裹在颗粒表面。环状水相互独立, 不能形成连续水体, 不能传递水压力; 而此时气相相互联通并且可以传递压力。

(2) 双开敞非饱和土: 含水率增加时, 环状水扩展成连续水体, 水气两相此时都连续, 均能传递压力。

(3) 气封闭非饱和土: 当饱和度进一步增大, 当水气界面不再与土颗粒搭接且自行封闭起来时, 气相将被封闭为空气泡, 自此直至完全饱和状态, 只有水相连续。

1.2 非饱和土的重新分类

为了研究不同饱和状态下吸力效应, 首先必须进一步探讨非饱和土的分类体系。

非饱和土的一个重要特征是孔隙水具有明显的表面现象。对于水封闭非饱和土, 如图 1 (a) 所示, 弯液面全部在土颗粒表面搭接, 表面张力全部作用于土颗粒。对于气封闭非饱和土, 在气泡边界上, 表面张力与液压平衡, 对土颗粒没有产生直接的作用, 即表面张力对颗粒的作用完全表现为液压。

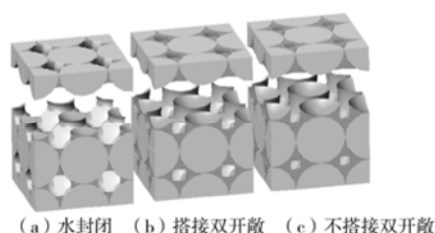


图 1 非饱和土中孔隙水的不同状态

Fig. 1 Different states of pore water in unsaturated soils

较为复杂的情况是双开敞非饱和土。考虑到表面张力对土颗粒的作用, 作者们认为可以按弯液面是否与颗粒表面搭接而将这种非饱和土进一步地细分为两种非饱和土: ①单个颗粒周围的弯液面仅部分与颗粒自身的表面搭接, 其余部分则与其它颗粒周围的弯液面相联, 不同颗粒周围的弯液面之间可以传递表面张力, 这里将处于这种状态的非饱和土称为搭接双开敞非饱和土, 如图 1 (b) 所示; ②当饱和度进一步增大时, 弯液面完全不与颗粒表面搭接, 此时各颗粒四周的表面张力在孔隙水表面传递, 表面张力对颗粒不产

生直接的作用, 这里将处于这种状态的非饱和土称为不搭接双开敞非饱和土, 如图 1 (c) 所示。由此可见, 对于这两种非饱和土, 表面张力的作用是完全不同的。

Fredlund^[5-6]和 Bishop^[7]两种强度理论认为, 孔隙气压力与孔隙水压力之差所形成的基质吸力 $s = u_a - u_w$ 是控制非饱和土强度的重要因素。实际上, 作为一种液体表面效应, 基质吸力的大小等于液面内外的压力差, 除此之外, 在液体表面还存在不可忽视的表面张力, 但是至今对表面张力与颗粒搭接并可能发挥“直接作用”的重要性尚未得到认识, 更缺乏定量分析。为此, 本文首先针对水封闭非饱和土, 探讨了张力吸力及其与基质吸力的相互关系, 进而应用等效吸力的概念分别确定了与张力吸力与基质吸力相应的等效吸力, 并进行了比较。考虑到搭接双开敞非饱和土和张力吸力的作用非常复杂, 而不搭接双开敞非饱和土和气封闭非饱和土两种状态中不存在液面与土颗粒搭接的情况, 因此本文暂仅以水封闭非饱和土的情况, 其他两种情况将在另文讨论。

2 各种饱和状态下的吸力作用

2.1 水封闭非饱和土

在环状水或水封闭条件下, 由于表面张力作用, 颗粒与孔隙水之间的相互作用关系如图 2 所示。此时弯液面全部与颗粒表面搭接。其中 a 为颗粒间距的一半, b 为液面的高度, 定义为饱和半径, δ 为接触角, σ 为表面张力系数。根据热力学原理, 当饱和半径给定时可以确定基质吸力^[8]。另外截取左侧球形颗粒为隔离体, 参见图 1 (a) 和图 2, 则表面张力 σ 在 x 方向所形成的合力 T 为

$$T = 2\pi y\sigma \sin(\delta + \arcsin(\frac{y}{R})) \quad (1)$$

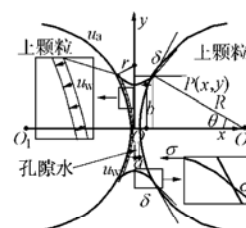


图 2 水封闭非饱和土中基质吸力和张力吸力的计算模型

Fig. 2 Computational model for matrix suction and tension suction in unsaturated soils with isolated pore water

根据图 1 (a) 和图 2, 基质吸力为均匀作用于球冠的分布力, 其合力与 T 方向一致。将 T 在基质吸力作用范围内的等效分布力定义为张力吸力 s_t , 则

$$s_t = \frac{T}{\pi y^2} = \frac{2\sigma \sin(\delta + \arcsin(\frac{y}{R}))}{y} \quad (2)$$

对于非饱和土,除气封闭情况之外,均可认为孔隙气与大气联通,孔隙气压力等于0;在不考虑重力作用的情况下,水环内各点压力相等,因此各点基质吸力均为

$$s = -u_w \quad (3)$$

由此可见,在水封闭的非饱和土中,同时存在基质吸力和张力吸力两种效应。值得指出的是,这里所提出的张力吸力和毛细吸力^[8]在概念上有所不同,苗天德以 ξ 平面(图2中过O点且正交于轴 O_1O_2 的平面)为参考平面,定义了毛细吸力和附加内压力^[8],具有力的量纲。而这里的张力吸力与基质吸力具有应力的量纲。当含水率增大到一定程度时,不同的水环之间将出现交叉和重叠,此时以 ξ 平面为参考平面所定义的毛细吸力可能导致计算的不准确性或概念上的模糊性。而这里的张力吸力与基质吸力一样,作用在球面上,以此为基础更便于采用等效吸力的概念。

2.2 搭接双开敞非饱和土

对于搭接非饱和土,固体颗粒、孔隙水与孔隙气三相之间的相互关系如图1(b)所示。只有部分弯液面与颗粒表面搭接,其余部分则相互联通,不同颗粒接触点处的孔隙水可以传递水压。此时仍然同时存在基质吸力和张力吸力。按照圆形液面假设,此时各片水将出现相互交叉与重叠,同时弯液面与颗粒表面的搭接关系也非常复杂,从而使得基质吸力的作用面积和张力吸力的计算极度困难。

2.3 不搭接双开敞非饱和土

当饱和度进一步增大至颗粒表面的所有区域都为水所包围时,弯液面就不再与颗粒表面搭接了,如图1(c)所示,此时只有基质吸力对颗粒存在作用,张力吸力则沿着液面传播,张力吸力本身将不再对土颗粒直接产生作用。

2.4 气封闭非饱和土

对于气封闭非饱和土,饱和度比较大,实际上基质吸力很小,基质吸力对土的工程性质基本上没有影响,同时张力吸力对颗粒也不存在作用。

3 水封闭非饱和土中的吸力分析

为了定量考察不同饱和度状态下基质吸力与张力吸力的大小及其作用效应,针对颗粒间距为 $a=0$ 和不同饱和半径 b 等情况,笔者采用所建议的方法^[8]根据式(1)和式(2)计算了水封闭状态下的两种吸力,计算结果列于表1。其中 V_{II} 为单片水环的体积, $V_{II}=3V_{II}$ 为每个颗粒周围的孔隙水体积, A_{II} 为单个水环在某个颗粒表面的作用面积, $A_e=6A_{II}$ 为每个颗粒周围孔隙水的作用面积。

为了客观地反映基质吸力和张力吸力的相对关系,将某一饱和度时张力吸力 s_t 与基质吸力 s 之比定义为吸力比 k ,同时将基质吸力与张力吸力之和定义合吸力 s_s ,于是

$$k = \frac{s_t}{s} \quad (4)$$

$$s_s = s + s_t = (1+k)s \quad (5)$$

由表可见,一般情况下张力吸力是存在的,而且有时远大于基质吸力。由此可以认为张力吸力的作用是不可忽略的,合吸力总是大于基质吸力。

目前通用的基质吸力概念仅着眼于其大小,而没有考虑同样重要的作用面积。因此作者们建议采用等效基质吸力概念^[9],等效吸力为吸力在颗粒总表面积上的平均值。将这一概念分别应用于张力吸力及合吸力,与之相对应的等效张力吸力 s_t^e 和等效合吸力 s^e 分别定义为

$$s_t^e = s_t \frac{A_e}{A}, \quad s_s^e = s_s \frac{A_e}{A} \quad (6)$$

式中, A 为颗粒的总表面积。根据表1所列计算结果,所得到的不同接触角情况下吸力比与饱和半径之间的关系如图3(a)所示。

由图可见,随着饱和半径的增大,张力吸力的作用相应地增大,当饱和半径超过某一数值而即使较小时,张力吸力的效应就可能超过基质吸力的作用而成为主导因素。令 $\xi = \ln k$,则在半对数坐标系中,吸力比与饱和半径之间的关系如图3(b)所示,由图可见吸力比的对数与饱和半径近似地呈现较好的线性关系,于是可以采用直线 $\xi = \alpha b - \beta$ 进行拟和,采用最小二乘法所确定的拟合系数列于表2,相应的拟合直线如图3(c)所示。由表2可见, α 和 β 均随接触角的增大而减小,但变化幅度很小,因此为了不过于复杂又能满足精度需要,对 α 和 β 随接触角的变化暂时不予考虑,直接取 α 和 β 分别为9.2和4.4。在接触角不是太大的情况下,尤其是对于岩土矿物,与水的接触角都不大,这个取值具有足够的精度。于是张力吸力与基质吸力之比与饱和半径的关系近似地表达为

$$k = \exp(9.2b - 4.4) \quad (7)$$

由此可见,随饱和半径增大,张力吸力与基质吸力之比增大,张力吸力效应增大;而饱和度越小,张力吸力的贡献越小。但即使在饱和度很低的情况下,比如 $s_r=1.1\%$,张力吸力与基质吸力之比也在20%左右,即张力吸力约占合吸力的1/6;当饱和度达到 $s_r=17\%$ 时,张力吸力与基质吸力之比可达2~4。因此对于水封闭非饱和土,张力吸力的作用必须加以考虑而不能予以忽略。

在科学试验和实际工程中,基质吸力可以通过各

表 1 基于本文方法计算所得到的各种吸力及其等效吸力

Table 1 The results of various types of suctions and equivalent suctions computed by the proposed method for an ideal unsaturated soil																		
δ /($^{\circ}$)	b / μm	x / μm	y / μm	r / μm	V_{11} / μm^3	V_{1t} / μm^3	A_{11} / μm^2	A_e / μm^2	s_r /%	s /kPa	s^c /kPa	s_t /kPa	s_t^c /kPa	k	$\xi=\ln k$	s_s /kPa	s_s^c /kPa	
12.5	0.3	0.0565	0.3314	0.0665	0.0143	0.0429	0.3550	2.1300	1.13	854.41	144.78	232.50	39.40	0.2721	-1.3015	1086.92	184.18	
	0.33	0.0698	0.3671	0.0843	0.0211	0.0633	0.4386	2.6314	1.66	644.74	134.97	222.61	46.60	0.3453	-1.0634	867.35	181.57	
	0.35	0.0796	0.391	0.0978	0.0269	0.0807	0.5001	3.0008	2.12	537.85	128.40	216.92	51.79	0.4033	-0.9080	754.77	180.19	
	0.38	0.0957	0.4269	0.1211	0.0378	0.1134	0.6013	3.6078	2.98	410.70	117.88	209.48	60.12	0.5100	-0.6733	620.18	178.00	
	0.40	0.1074	0.4509	0.1388	0.0468	0.1404	0.6748	4.0489	3.69	343.44	110.62	205.09	66.06	0.5972	-0.5155	548.53	176.69	
	0.43	0.1265	0.4868	0.1692	0.063	0.189	0.7948	4.7689	4.96	261.67	99.28	199.24	75.59	0.7614	-0.2726	460.92	174.87	
	0.45	0.1402	0.5107	0.1924	0.0761	0.2283	0.8809	5.2854	5.99	217.20	91.33	195.74	82.30	0.9012	-0.1040	412.93	173.63	
	0.48	0.1624	0.5462	0.2321	0.0994	0.2982	1.0204	6.1223	7.83	162.44	79.12	191.00	93.03	1.1759	0.1620	353.44	172.15	
	0.50	0.1782	0.5698	0.2624	0.1177	0.3531	1.1197	6.7180	9.27	132.20	70.65	188.11	100.54	1.4229	0.3527	320.32	171.19	
	0.53	0.2035	0.6047	0.3147	0.1499	0.4497	1.2786	7.6718	11.80	94.23	57.51	184.16	112.40	1.9543	0.6701	278.39	169.91	
10	0.55	0.2215	0.6276	0.3548	0.1748	0.5244	1.3917	8.3504	13.76	73.02	48.51	181.74	120.73	2.4888	0.9118	254.76	169.24	
	0.58	0.2500	0.6614	0.4244	0.2178	0.6534	1.5708	9.4248	17.15	46.15	34.60	178.37	133.74	3.8655	1.3521	224.52	168.34	
	0.3	0.0572	0.3334	0.0657	0.014	0.042	0.3594	2.1564	1.10	867.78	148.87	215.47	36.96	0.2483	-1.3931	1083.25	185.83	
	0.33	0.0708	0.3695	0.0832	0.0212	0.0636	0.4448	2.6691	1.67	656.19	139.33	207.54	44.07	0.3163	-1.1511	863.73	183.40	
	0.35	0.0808	0.3937	0.0965	0.027	0.081	0.5077	3.0461	2.13	547.91	132.77	202.98	49.19	0.3705	-0.9930	750.88	181.96	
	0.38	0.0972	0.4301	0.1194	0.038	0.114	0.6107	3.6644	2.99	419.29	122.23	197.00	57.43	0.4698	-0.7554	616.28	179.66	
	0.40	0.1092	0.4544	0.1368	0.047	0.141	0.6861	4.1167	3.70	351.13	115.00	193.48	63.37	0.5510	-0.5960	544.61	178.36	
	0.43	0.1288	0.4909	0.1666	0.0633	0.1899	0.8093	4.8556	4.98	268.41	103.68	188.78	72.92	0.7033	-0.3519	457.18	176.60	
	0.45	0.1429	0.5151	0.1893	0.076	0.228	0.8979	5.3872	5.98	223.41	95.75	185.97	79.70	0.8324	-0.1834	409.38	175.45	
	0.48	0.1657	0.5513	0.2282	0.0999	0.2997	1.0411	6.2467	7.87	167.81	83.40	182.15	90.52	1.0854	0.0820	349.96	173.92	
7.5	0.50	0.182	0.5752	0.2578	0.118	0.354	1.1435	6.8612	9.29	137.17	74.87	179.84	98.16	1.3111	0.2709	317.00	173.03	
	0.53	0.2081	0.6107	0.3089	0.1507	0.4521	1.3075	7.8452	11.87	98.59	61.53	176.66	110.25	1.7919	0.5833	275.24	171.78	
	0.55	0.2266	0.634	0.3479	0.1757	0.5271	1.4238	8.5426	13.83	77.10	52.40	174.71	118.73	2.2659	0.8180	251.81	171.13	
	0.58	0.2562	0.6684	0.4155	0.2191	0.6573	1.6098	9.6585	17.25	49.83	38.29	171.99	132.16	3.4516	1.2388	221.82	170.45	
	0.30	0.0579	0.3354	0.0651	0.0144	0.0432	0.3638	2.1828	1.13	878.02	152.47	198.28	34.43	0.2258	-1.4880	1076.30	186.90	
	0.33	0.0718	0.372	0.0823	0.0213	0.0639	0.4511	2.7068	1.68	665.79	143.37	192.30	41.41	0.2888	-1.2419	858.09	184.78	
	0.35	0.082	0.3965	0.0955	0.0271	0.0813	0.5152	3.0913	2.13	555.83	136.69	188.87	46.45	0.3398	-1.0794	744.70	183.14	
	0.38	0.0988	0.4334	0.1181	0.0381	0.1143	0.6208	3.7247	3.00	426.01	126.23	184.38	54.63	0.4328	-0.8375	610.39	180.87	
	0.40	0.1111	0.4581	0.1353	0.0471	0.1413	0.6981	4.1884	3.71	357.04	118.97	181.73	60.55	0.5090	-0.6753	538.77	179.52	
	0.43	0.1312	0.4952	0.1647	0.0635	0.1905	0.8244	4.9461	5.00	273.46	107.60	178.18	70.11	0.6516	-0.4283	451.65	177.72	
5	0.45	0.1457	0.5197	0.1869	0.0767	0.2301	0.9155	5.4928	6.04	228.36	99.79	176.08	76.94	0.7711	-0.2600	404.44	176.73	
	0.48	0.1692	0.5565	0.2252	0.1003	0.3009	1.0631	6.3787	7.90	172.07	87.32	173.20	87.89	1.0066	0.0065	345.28	175.21	
	0.50	0.186	0.5809	0.2544	0.1188	0.3564	1.1687	7.0120	9.35	140.95	78.63	171.45	95.64	1.2164	0.1959	312.40	174.27	
	0.53	0.213	0.6169	0.3044	0.1514	0.4542	1.3383	8.0299	11.92	102.08	65.21	169.06	108.00	1.6562	0.5045	271.14	173.21	
	0.55	0.2322	0.6407	0.3426	0.1766	0.5298	1.4590	8.7537	13.91	80.35	55.96	167.59	116.71	2.0857	0.7351	247.94	172.66	
	0.58	0.2628	0.6756	0.4088	0.2202	0.6606	1.6512	9.9073	17.34	52.71	41.54	165.55	130.48	3.1408	1.1445	218.26	172.02	
	0.30	0.0587	0.3376	0.0646	0.014	0.042	0.3688	2.2129	1.10	886.70	156.10	180.92	31.85	0.2040	-1.5894	1067.62	187.95	
	0.33	0.0728	0.3746	0.0817	0.0213	0.0639	0.4574	2.7445	1.68	672.30	146.79	176.94	38.63	0.2632	-1.3349	849.24	185.42	
	0.35	0.0833	0.3995	0.0948	0.027	0.081	0.5234	3.1403	2.13	561.47	140.27	174.64	43.63	0.3110	-1.1678	736.11	183.90	
	0.38	0.1005	0.437	0.1172	0.0382	0.1146	0.6315	3.7888	3.01	430.76	129.84	171.64	51.73	0.3984	-0.9202	602.40	181.57	
2.5	0.40	0.1131	0.462	0.1342	0.047	0.141	0.7106	4.2638	3.70	361.46	122.61	169.87	57.62	0.4700	-0.7551	531.34	180.23	
	0.43	0.1338	0.4997	0.1633	0.0637	0.1911	0.8407	5.0441	5.02	277.26	111.26	167.50	67.22	0.6041	-0.5040	444.76	178.48	
	0.45	0.1487	0.5247	0.1854	0.077	0.231	0.9343	5.6059	6.06	231.52	103.25	166.09	74.07	0.7174	-0.3321	397.61	177.32	
	0.48	0.1729	0.5621	0.2232	0.1006	0.3018	1.0864	6.5182	7.92	174.98	90.73	164.17	85.13	0.9382	-0.0638	339.15	175.86	
	0.50	0.1903	0.5869	0.2519	0.1192	0.3576	1.1957	7.1741	9.39	143.80	82.07	163.00	93.03	1.1335	0.1253	306.80	175.10	
	0.53	0.2182	0.6236	0.3013	0.1519	0.4557	1.3710	8.2259	11.96	104.55	68.42	161.40	105.62	1.5438	0.4342	265.94	174.04	
	0.55	0.2381	0.6477	0.339	0.1773	0.5319	1.4960	8.9762	13.96	82.61	58.99	160.41	114.55	1.9418	0.6636	243.02	173.54	
	0.58	0.2699	0.6833	0.4041	0.2211	0.6633	1.6958	10.1750	17.41	54.79	44.35	159.04	128.74	2.9029	1.0657	213.83	173.09	
	0.3	0.0595	0.3399	0.0644	0.0144	0.0432	0.3738	2.2431	1.13	890.21	158.86	163.48	29.17	0.1836	-1.6948	1053.69	188.03	
	0.33	0.074	0.3774	0.0814	0.0213	0.0639	0.4650	2.7897	1.68	675.59	149.94	161.49	35.84	0.2390	-1.4312	837.08	185.78	
	0.35	0.0846	0.4026	0.0943	0.0272	0.0816	0.5316	3.1893	2.14	565.55	143.50	160.34	40.68	0.2835	-1.2605	725.89	184.18	
	0.38	0.1024	0.4407	0.1166	0.0382	0.1146	0.6434	3.8604	3.01	433.97	133.28	158.83	48.78	0.3660	-1.0051	592.80	182.06	
	0.40	0.1153	0.4662	0.1335	0.0473	0.1419	0.7245	4.3467	3.72	364.32	125.98	157.95	54.62	0.4335	-0.8358	522.26	180.60	
	0.43	0.1366	0.5045	0.1625	0.0638	0.1914	0.8583	5.1497	5.02	279.46	114.49	156.76	64.22	0.5609	-0.5782	436.22	17	

续表

δ /($^{\circ}$)	b / μm	x / μm	y / μm	r / μm	V_{11} / μm^3	V_{1t} / μm^3	A_{11} / μm^2	A_e / μm^2	s_r /%	s /kPa	s^c /kPa	s_t /kPa	s_i^c /kPa	k	$\zeta=\ln k$	s_s /kPa	s_s^c /kPa
0	0.30	0.0604	0.3423	0.0643	0.014	0.042	0.3795	2.2770	1.10	891.97	161.58	146.00	26.45	0.1637	-1.8098	1037.97	188.03
	0.33	0.0752	0.3804	0.0813	0.0213	0.0639	0.4725	2.8350	1.68	676.70	152.62	146.00	32.93	0.2158	-1.5336	822.70	185.55
	0.35	0.0861	0.406	0.0942	0.027	0.0810	0.5410	3.2459	2.13	566.38	146.25	146.00	37.70	0.2578	-1.3557	712.38	183.95
	0.38	0.1043	0.4447	0.1165	0.0382	0.1146	0.6553	3.9320	3.01	434.50	135.92	146.00	45.67	0.3360	-1.0906	580.50	181.59
	0.40	0.1176	0.4706	0.1333	0.047	0.1410	0.7389	4.4334	3.70	365.14	128.78	146.00	51.49	0.3999	-0.9167	511.14	180.28
	0.43	0.1396	0.5095	0.1622	0.0638	0.1914	0.8771	5.2628	5.02	280.29	117.35	146.00	61.13	0.5209	-0.6522	426.29	178.48
	0.45	0.1555	0.5355	0.1841	0.0770	0.2310	0.9770	5.8622	6.06	234.30	109.27	146.00	68.09	0.6231	-0.4730	380.30	177.36
	0.48	0.1813	0.5743	0.2215	0.1008	0.3024	1.1391	6.8348	7.94	177.49	96.51	146.00	79.39	0.8226	-0.1953	323.49	175.89
	0.50	0.2000	0.6000	0.2500	0.1200	0.3600	1.2566	7.5398	9.45	146.00	87.57	146.00	87.57	1.0000	0.0000	292.00	175.15
	0.53	0.2301	0.6381	0.2988	0.1523	0.4569	1.4458	8.6746	11.99	106.57	73.55	146.00	100.75	1.3699	0.3148	252.57	174.30
	0.55	0.2516	0.6632	0.3361	0.178	0.5340	1.5808	9.4851	14.02	84.47	63.74	146.00	110.17	1.7284	0.5472	230.47	173.91
	0.58	0.286	0.7001	0.4005	0.2217	0.6651	1.7970	10.7819	17.46	56.41	48.39	146.00	125.23	2.5882	0.9510	202.41	173.62

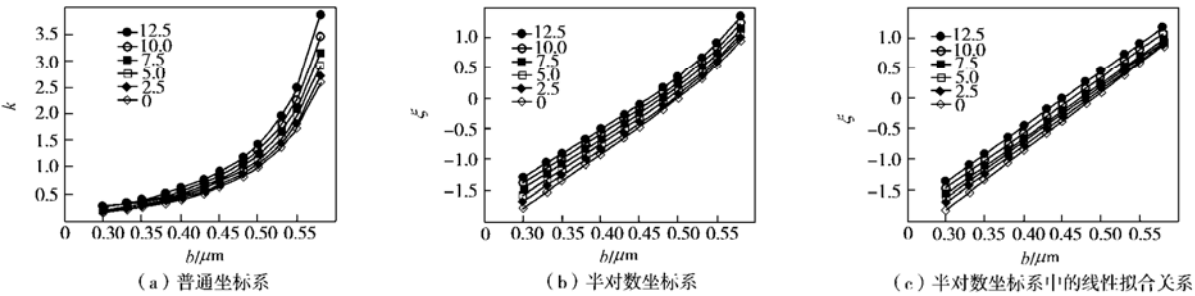


图 3 不同接触角 ($\delta=12.5^{\circ}$ 、 10° 、 7.5° 、 5° 、 2.5° 和 0°) 情况下吸力比与饱和半径的关系

Fig. 3 Relationship between suction ratio and saturation radius for different contact angles ($\delta=12.5^{\circ}$, 10° , 7.5° , 5° , 2.5° and 0°)

种方法测得, 最简捷的方法是根据含水率由非饱和土的土水特征曲线确定基质吸力。而由于张力吸力是由表面张力等效得到的, 因此无法直接测定。根据饱和度, 利用经验关系 (6) 可得到张力吸力与基质吸力之比, 再由基质吸力和吸力比确定张力吸力。进而可确定合吸力及其相应的等效合吸力。

表 2 吸力比对数与饱和半径之间近似线性关系的拟合系数

Table 2 The parameters defined by curve-fitting in the empirical correlation between logarithmic saturation radius and suction ratio

接触角 δ /($^{\circ}$)	α	β	标准差
12.5	9.1	4.1	0.2760
10.0	9.1	4.2	0.2470
7.5	9.1	4.3	0.2242
5.0	9.2	4.4	0.2057
2.5	9.3	4.5	0.1925
0.0	9.6	4.7	0.1816

对表 1 所列的计算结果进行分析, 对于不同的接触角, 所得到的基质吸力、张力吸力和合吸力与饱和度之间的关系如图 4 所示。由图 4 可见, 在理论上讲, 基质吸力、张力吸力和合吸力均随饱和度的增加而减小。然而张力吸力的变化幅度较小, 可以认为张力吸力近似为一常量, 合吸力的变化主要由基质吸力的变化所引起。当饱和度增大而使非饱和土处于搭接双开敞状态时, 由于液面与土颗粒的搭接迅速减小, 张力吸力也将迅速减小, 当饱和度继续增大而使非饱和土处于不搭接双开敞状态时, 由于液面不再与颗粒搭接,

张力吸力将降低为 0。在气封闭非饱和土中, 由于孔隙气根本不与颗粒表面搭接, 张力吸力根本不存在。因此在双开敞状态下, 随着饱和度的增大, 合吸力将呈现出一个较大的降低。

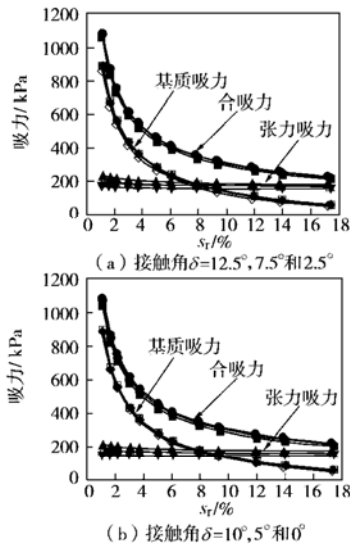


图 4 各种吸力与饱和度之间的理论关系

Fig. 4 Theoretical interrelations between various types of suctions and saturation degree

为了同时反映吸力大小与作用面积的共同效应, 根据表 1 所列计算结果, 图 5 给出了各种等效吸力与饱和度之间关系。由图可见, 随着饱和度的增大, 等效基质吸力迅速降低, 而等效张力吸力增大; 等效合