



张芳枝 梁志松 周秋娟 编著

非饱和土性状及其 边坡稳定性

FEIBAOHETU XINGZHUANG JIQI
BIANPO WENDINGXING



中国水利水电出版社
www.waterpub.com.cn



非饱和土性状及其 边坡稳定性

张芳枝 梁志松 周秋娟 编著



中国水利水电出版社
www.waterpub.com.cn

内 容 提 要

本书结合近年来非饱和土的基本性状试验研究、非饱和土边坡渗流以及稳定性研究进展, 总结并介绍了目前非饱和土性状试验成果, 以及非饱和土边坡渗流特性和边坡稳定性分析成果。本书共分为 5 章, 内容包括: 非饱和土的土-水特征曲线试验研究概述, 非饱和土变形和强度特性的试验研究, 非饱和土的渗流特性, 降雨条件下饱和-非饱和土坡的稳定性分析, 非饱和土堤防渗流特性与稳定性分析。让读者了解非饱和土性状及其边坡稳定性研究新进展, 包括非饱和土的变形、强度和渗流特性试验与研究成果, 以及非饱和土边坡渗流和稳定分析的有关成果。

本书可作为水利、土建、岩土、地质等有关专业教师、研究生阅读, 亦可作为相关科研和工程技术人员的参考用书。

图书在版编目 (C I P) 数据

非饱和土性状及其边坡稳定性 / 张芳枝, 梁志松,
周秋娟编著. — 北京: 中国水利水电出版社, 2011. 12
ISBN 978-7-5084-9278-0

I. ①非… II. ①张… ②梁… ③周… III. ①土渗透
性-饱和渗流-边坡稳定性 IV. ①TU411.4②TV698.2

中国版本图书馆CIP数据核字(2011)第265804号

书 名	非饱和土性状及其边坡稳定性
作 者	张芳枝 梁志松 周秋娟 编著
出版发行	中国水利水电出版社 (北京市海淀区玉渊潭南路 1 号 D 座 100038) 网址: www.waterpub.com.cn E-mail: sales@waterpub.com.cn 电话: (010) 68367658 (发行部)
经 售	北京科水图书销售中心 (零售) 电话: (010) 88383994、63202643、68545874 全国各地新华书店和相关出版物销售网点
排 版	中国水利水电出版社微机排版中心
印 刷	三河市鑫金马印装有限公司
规 格	184mm×260mm 16 开本 7 印张 166 千字
版 次	2011 年 12 月第 1 版 2011 年 12 月第 1 次印刷
印 数	0001—1600 册
定 价	22.00 元

凡购买我社图书, 如有缺页、倒页、脱页的, 本社发行部负责调换

版权所有·侵权必究

前言

非饱和土边坡稳定性研究涉及两方面问题，一是关于非饱和土体的特性研究，如土体的反复干湿特性、固结特性、强度特性、渗透特性等；二是关于降雨条件下的边坡或水位升降条件下堤防等稳定性研究。本书基于广东省水利科技计划项目“堤防非饱和土性状及其边坡稳定性研究”的成果，结合近年来非饱和土性状、非饱和土边坡渗流以及稳定性研究进展，介绍和总结目前非饱和土力学性状试验的新成果，以及非饱和土边坡渗流特性和稳定性分析方法和结果，并探讨非饱和土边坡失稳破坏机理。

当水位上升或下降时，实际堤防工程的填土区域将处于部分饱和与部分非饱和状态，且饱和区与非饱和区的水流互相联系、互相影响，各自范围也随之变化。因此，从理论上说，在进行水位变动条件下的堤岸边坡渗流分析时考虑饱和—非饱和的渗流计算方法比只进行饱和渗流分析更接近实际。此外，考虑基质吸力对堤防边坡稳定性的贡献，利用非饱和土强度试验结果和非饱和土强度理论，将强度折减有限元法推广到非饱和土边坡，以了解水位反复涨落对非饱和堤岸稳定性的影响；作为比较，本书也介绍了不考虑非饱和土性状在渗流场与应力场耦合模型基础上的堤防边坡稳定性分析方法和成果；另外，本书还根据非饱和土反复干湿循环试验结果和非饱和土强度理论，探讨水位反复涨落对非饱和堤岸稳定性的影响。

采用多种手段研究非饱和土性状及其边坡稳定性，在理论和实践上都有重要意义。为此，本书作者开展了非饱和土的变形和强度特性、边坡稳定性及其数值模拟的研究，并介绍和总结了近年来其他研究者的成果。全书包括三部分内容：一是非饱和土的渗透、变形和强度特性试验研究；二是降雨条件下饱和—非饱和土坡的稳定分析；三是非饱和土堤防渗流特性与稳定性分析。

本书第1章、第2章、第5章由张芳枝（广东水利电力职业技术学院）编写，第3章由周秋娟（广东水利电力职业技术学院）编写，第4章由梁

志松（广东水利电力职业技术学院）编写。全书由张芳枝和梁志松统稿。

此外，黄丽娟（广东水利电力职业技术学院）参与了书中一些插图的制作工作，在此表示诚挚的谢意。

由于作者水平所限，书中的谬误和不当之处，敬请读者不吝赐教。

编者

2011年7月

目 录

前言

第 1 章 非饱和土的土—水特征曲线试验研究概述	1
1.1 非饱和土的土—水特征曲线	1
1.2 干燥与吸湿过程中的土—水特征曲线	7
1.3 非饱和土的理论土—水特征曲线	8
参考文献	11
第 2 章 非饱和土变形和强度特性的试验研究	12
2.1 非饱和土的强度基本理论	12
2.2 非饱和土的变形和强度特性试验方法	14
2.3 非饱和土的变形特性试验成果	17
2.4 非饱和土的强度特性试验成果	22
2.5 干湿过程中非饱和土的变形和强度特性	25
2.6 反复干湿循环对非饱和土的力学特性影响	29
参考文献	33
第 3 章 非饱和土的渗流特性	35
3.1 非饱和土的渗透特性试验方法	35
3.2 非饱和土的渗透特性	49
3.3 降雨条件下坡地饱和—非饱和土径流渗流耦合	54
参考文献	57
第 4 章 降雨条件下饱和—非饱和土坡的稳定性分析	61
4.1 降雨入渗理论	61
4.2 降雨入渗条件下饱和—非饱和土坡稳定性分析	65
4.3 降雨条件下对土坡稳定性的影响分析	78
参考文献	84
第 5 章 非饱和土壤防渗流特性与稳定性分析	85
5.1 饱和—非饱和土渗流固结分析基本理论及方法	85
5.2 饱和—非饱和土边坡稳定性分析基本理论及方法	91
5.3 计算模型和计算中有关问题的处理	96
5.4 计算成果及分析	99
参考文献	106

第 1 章 非饱和土的土—水特征曲线 试验研究概述

一般认为，非饱和土是固体颗粒、孔隙水和孔隙气所组成的三相系，同时液—气界面的性质既不同于液体也不同于气体，目前人们把液—气界面的收缩膜作为独立的第四相考虑。孔隙的存在使得土中力系含有总应力作用和基质吸力作用。

非饱和土的工程特性紧密地依赖于基质吸力，也就是说基质吸力在控制非饱和土的力学性状方面起着十分重要的作用，而基质吸力又与土中的含水量密切相关，因此，确定非饱和土的变形与强度特性中的一个关键问题是确定其土—水特征曲线，土体水分特征曲线 (SWCC) 源于土壤科学，是用来描述吸力与含水量关系的特性曲线，其基本参数有空气进气值与残余饱和度，由 SWCC 特性可以推测非饱和土的渗透函数、抗剪强度等有关参数。本章主要介绍近年来非饱和土的土—水特征曲线试验研究的有关成果。

1.1 非饱和土的土—水特征曲线

1.1.1 土—水特征曲线的基本参数

1. 土—水特征曲线

土中的基质吸力不同，对应的土的含水量不同，土中的基质吸力与含水量（或饱和度）之间存在着一定的关系，这种关系就是土—水特征曲线。土—水特征曲线通常以饱和度（或质量含水量、体积含水量）为纵坐标，基质吸力的对数值为横坐标来表示，如图 1.1 所示。

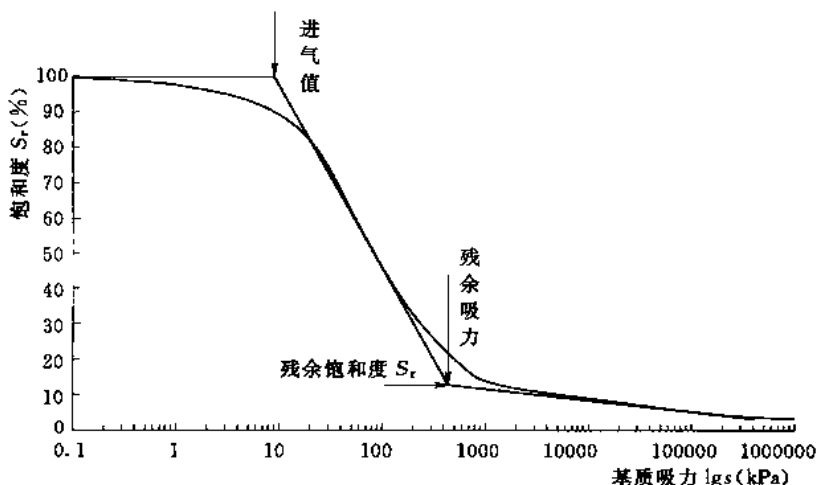


图 1.1 土—水特征曲线

2. 土—水特征曲线的基本参数

(1) 进气值。土体在脱湿过程中，当吸力增加到一定值时，土体外空气将冲破水膜进入土体，此时的吸力值称为进气值。理论上讲，进气值表征了引起土体内部最大孔隙中产生减饱和所必需的水、气压力差。通过将土—水特征曲线中斜率恒定部分延长并与饱和度 100% 时的吸力轴相交，交点对应的吸力值即为进气值，如图 1.1 所示。

(2) 残余饱和度。随非饱和土基质吸力的增大，其饱和度连续减小，至一定值 S_r 时，饱和度的继续减小需要增加很大的吸力，该值定义为残余饱和度 S_r ，如图 1.1 所示。残余饱和度 S_r 可认为是当液相开始变得不连续时的饱和度，它代表了一个含水量值。当减饱和到此值后，土样中的水会越来越难于通过吸力的增大而排出，即吸力对减饱和的作用大幅下降，而此后只有通过蒸发才能有效排水。根据残余饱和度可获取数值模型中的有关参数，用以预测非饱和土的渗透性或抗剪强度等。

土性不同，进气值和残余饱和度便不相同。

1.1.2 土—水特征曲线的影响因素试验分析成果

影响土—水特征曲线的因素很多，主要有土的矿物成分、孔隙结构、土粒的应力状态、液体的性质以及孔隙气等，不同土类典型的土—水特征曲线如图 1.2 所示，从图中黏质土、粉质土、砂质土的 SWCC 比较可以看出，黏土含量越高，土体的持水性能越强，脱水速度就越慢，可见土体的矿物组成对 SWCC 影响较大。下面分别介绍土粒的应力状态（围压）、土体塑性、孔隙比等因素对土—水特征曲线的影响试验研究成果。

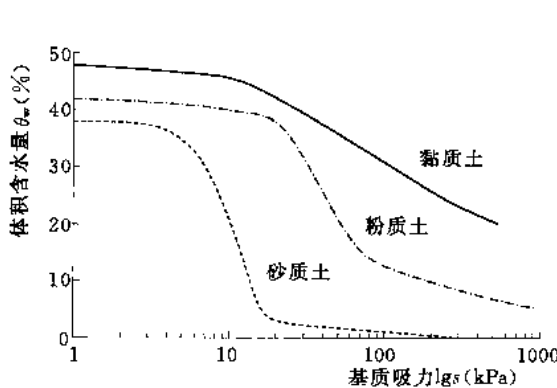


图 1.2 不同土质的土—水特征曲线

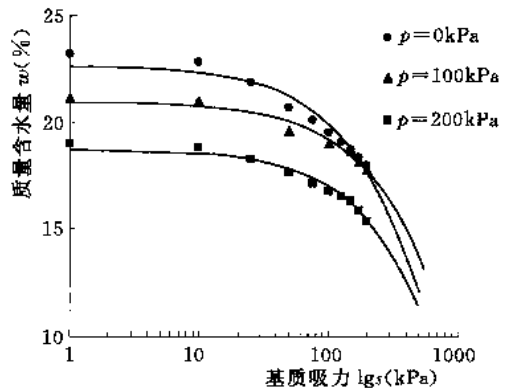


图 1.3 黏性土在不同围压条件下的土—水特征曲线

1. 围压的影响

天然状态下的土层，在不同深度受到不同的周围压力，致使土样的孔隙结构随深度具有一定变化。采用珠江三角洲的黏性土进行脱湿路径的含水量与基质吸力关系的三轴试验研究，在不同的固结压力下，黏性土的 SWCC 曲线如图 1.3 所示。从图中可知，在相同的含水量下，固结压力越大，基质吸力越小。由此可见，土样受到的固结压力越大，其内部孔隙分布越小，孔隙比变小，土样持水能力增强。

2. 土体塑性的影响（李志清等，2007）

土的矿物成分组成一定程度反映在土的颗粒大小和土的塑性值上，土体塑性对

SWCC 曲线的影响，可以反映土样的矿物成分对其的影响。

李志清等 (2007) 对不同塑性的土体进行了 SWCC 试验研究，其成果如图 1.4 所示。塑性指数 I_p 值大的土样曲线在上面， I_p 值小的土样曲线在下面。当基质吸力为 500kPa 时， I_p 由大到小对应的 3 种土样含水量分别为 44.0%、36.0%、18.5%。塑性指数的大小与土中结合水的含量有关，即与土的颗粒组成、土粒的矿物成分、土中水的离子成分和浓度等因素有关。一般 I_p 越大的土样，黏粒含量越高，其比表面积和可能的结合水含量越高，在相同含水量下的基质吸力越大，在相同基质吸力条件下，储水能力越强，脱水速度越慢，这种现象在基质吸力较小时表现最明显。当基质吸力较大时，图 1.4 中曲线均变得比较平缓，土样储水能力相差较小。

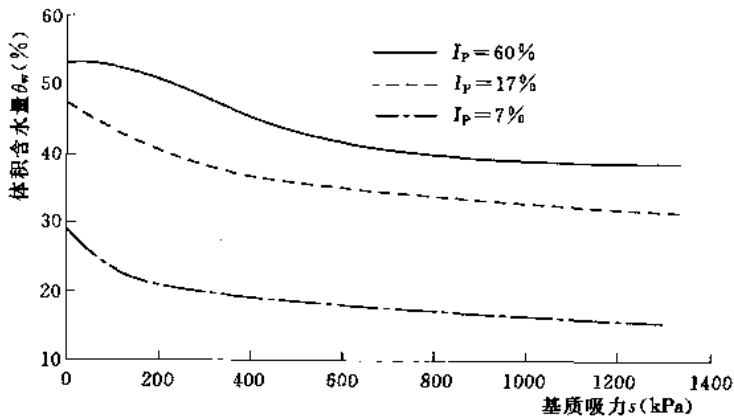


图 1.4 不同塑性指数土样的干燥 SWCC 比较 (李志清等, 2007)

3. 孔隙比的影响 (李志清等, 2006)

李志清等 (2006) 通过试验证明，孔隙比对 SWCC 的进气值和储水能力有较大影响，如图 1.5 所示，孔隙比较大的土体进气值较小，孔隙比较小的土体含水量变化较小，表现出较好的持水能力。随着基质吸力的增加，两条曲线出现交叉，孔隙比大的土体曲线斜率较大。当基质吸力较小时，孔隙比的影响较大，当基质吸力达到一定值后，孔隙比的影响

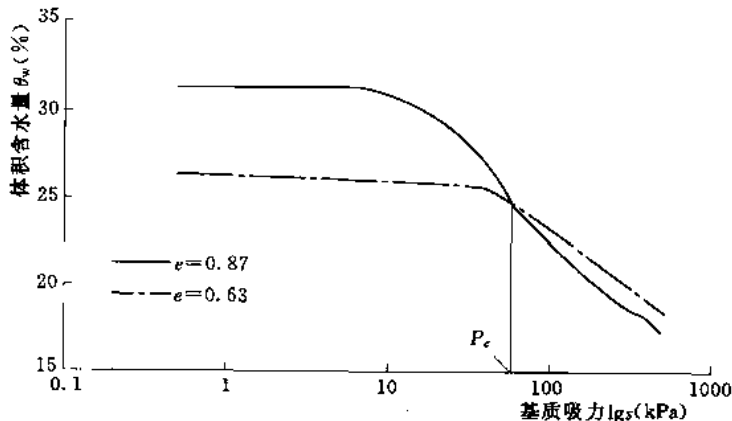


图 1.5 不同孔隙比的 SWCC (李志清等, 2006)

变得较小。李志清等(2006)分析,可能的原因是,初始孔隙比较小的土体随着水分的排出,土体密度增大,单位体积中细小孔隙增加更快,持水能力更强。在含水量较低时,两个试样的孔隙比较接近,其负孔隙水压力相当。对于土体持水性,可能存在临界基质吸力 P_c 。当基质吸力小于 P_c 时, e 的影响较大,当基质吸力大于 P_c 时, e 的影响将明显变弱。相同土样击实前后的差别就在于孔隙比的变化,击实前孔隙比较大,击实后孔隙比较小,所以击实土的持水能力较好,土壤含水量变化较小。

1.1.3 土-水特征曲线的拟合

Fredlund(1997)根据土样的颗分曲线,用统计分析的方法推导出适用于不同土类的土-水特征曲线拟合公式。不同的研究者根据含水量与基质吸力之间的变化试验结果,采用了不同方法拟合非饱和土的土-水特征曲线特性,获得非饱和土的土-水特征曲线模型。其目的是利用拟合模型推求土-水特征曲线,即可通过有限的试验数据预测土的土-水特征曲线。下面介绍最近的土-水特征曲线拟合的有关成果。

1. 不同围压下的土-水特征曲线函数拟合(李永乐等,2005)

李永乐等(2005)采用黄河下游黄河大堤开封段的粉质黏土试样,利用非饱和土三轴仪开展了不同围压条件下的含水量与基质吸力之间的变化关系研究。试样制备过程中控制干密度,使其等于工程实际干密度($1.51\text{g}/\text{cm}^3$),采用分层压实法,配置含水量为5%,10%,15%,20%,25%的圆柱样,试样高度为12.5cm,直径为6.18cm。根据试验得出的结果,来推求不同围压条件下的含水量与基质吸力之间的变化关系及其曲线模型。

以基质吸力为横坐标,以质量含水量为纵坐标,得到某一围压(50kPa、150kPa、250kPa、350kPa、450kPa)下的土-水特征曲线,如图1.6~图1.10所示,图中给出了不同围压下质量含水量-基质吸力关系实测结果。对不同围压下质量含水量-基质吸力的实测结果进行拟合,拟合函数为:

$$w = \frac{a + bs}{1 + cs + ds^2} \quad (1.1)$$

式中 w ——质量含水量,%;

s ——基质吸力,kPa;

a, b, c, d ——拟合参数,不同围压下的拟合参数见表1.1。

表 1.1 不同围压下质量含水量-基质吸力拟合参数表(李永乐等,2005)

围压 (kPa)	拟合参数			
	a	b	c	d
50	0.304636	3.16×10^8	3.02×10^8	1.33×10^8
100	0.305158	-0.041800	-0.043710	-0.013210
200	0.306250	0.016869	0.263075	0.003534
300	0.304940	0.107714	0.804775	0.035510
400	0.304940	0.107714	0.804775	0.035510

从图1.6~图1.10可以看出:①在某围压下,基质吸力值随含水量的减少而逐渐增

加；②当质量含水量小于10%时，基质吸力值是急剧增加的，即当质量含水量发生很小的变化时，基质吸力值却发生很大的变化。

2. 指数衰减函数拟合土-水特征曲线 (谈云志、王世梅, 2007)

谈云志、王世梅 (2007) 采用 Tempe 压力膜仪测定了清江古树包滑坡滑带低液限黏土的质量含水量与基质吸力的关系，以探讨非饱和土的质量含水量随基质吸力变化的规律。并利用指数衰减函数对该土-水特征曲线进行了描述，结合土-水特征曲线的性质，对指数衰减函数中参数的物理意义作了明确的定义。测定的数据整理结果，见表 1.2。

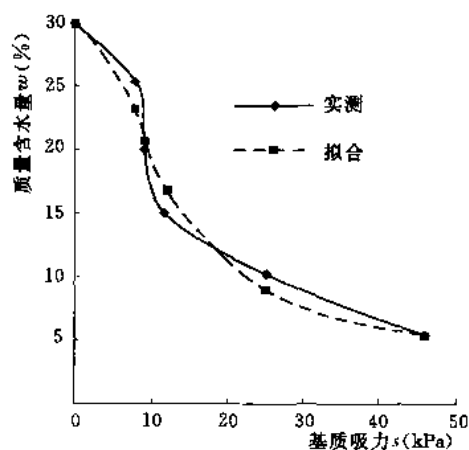


图 1.6 50kPa 围压条件下含水量—基质吸力的实测与拟合曲线 (李永乐等, 2005)

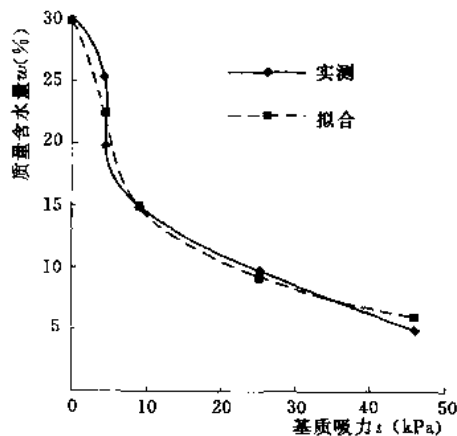


图 1.7 100kPa 围压条件下含水量—基质吸力实测与拟合曲线 (李永乐等, 2005)

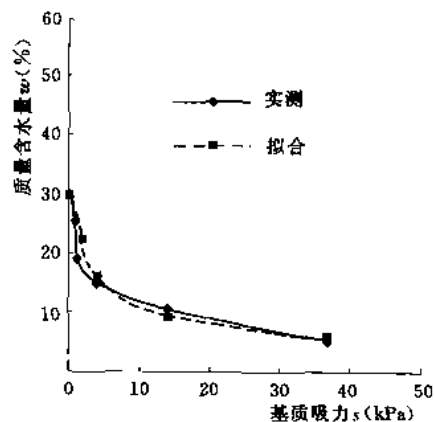


图 1.8 200kPa 围压条件下含水量—基质吸力实测与拟合曲线 (李永乐等, 2005)

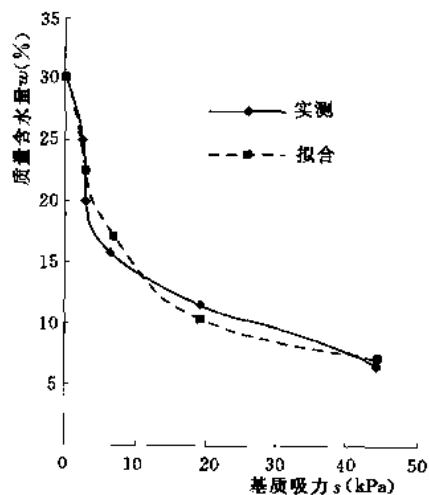


图 1.9 300kPa 围压条件下含水量—基质吸力实测与拟合曲线 (李永乐等, 2005)

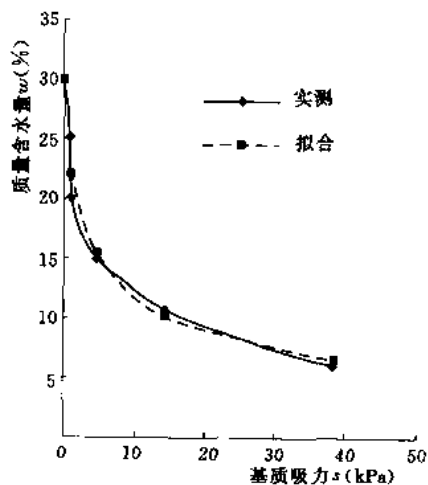


图 1.10 400kPa 围压条件下含水量—基质吸力实测与拟合曲线 (李永乐等, 2005)

表 1.2 土样基质吸力与对应质量含水量 (谈云志、王世梅, 2007)

%

基质吸力 (kPa)	1	2	3	4	5	6	7	8
0	21.1554	20.8785	20.8746	21.0079	20.6648	20.9134	21.1332	20.5839
20	19.3231	19.2823	19.3898	19.4999	18.9803	19.4202	19.4718	19.1182
40	18.0559	17.9109	17.6888	18.1817	17.3392	18.1166	18.4994	17.5451
80	16.6834	16.9304	16.6228	16.9122	16.1474	16.8547	17.2973	16.4872
150	15.4508	15.3498	14.6345	15.3693	14.6329	14.9114	15.7647	14.6906
300	13.1448	13.0687	12.5234	12.874	12.1244	12.1356	13.3657	12.2558
500	11.8345	11.6783	11.8935	11.5105	11.5086	11.9045	11.8922	11.8071
800	11.5302	10.9434	11.2186	10.9445	10.3775	11.1380	11.2781	11.3242

非饱和土中质量含水量随着基质吸力发生变化, 从而引起土的工程性质的明显变化。为了更好地反映两者之间的内在规律和联系, 现利用指数衰减函数关系式拟合质量含水量和基质吸力之间的关系。即:

$$w = B_0 + B_1 e^{-s/t} \quad (1.2)$$

式中 w, s ——质量含水量和基质吸力;

B_0, B_1, t ——随土样不同而变化的拟合参数。

利用式 (1.2) 拟合表 1.2 的数据, 其拟合参数见表 1.3。

表 1.3 公式拟合参数 (谈云志、王世梅, 2007)

编 号	指数衰减函数			
	B_0	B_1	t	R_2
1	11.598	9.018	154.535	0.9892
2	11.014	9.341	183.328	0.9911
3	11.462	9.141	135.251	0.9939
4	10.950	9.654	176.939	0.9946
5	10.773	9.414	150.933	0.9877
6	11.258	9.457	146.277	0.9949
7	11.222	9.428	192.000	0.9941
8	11.419	8.912	136.820	0.9942
平均值	11.212	9.296	159.510	0.9926

由表 1.3 数据可知, 对该试验结果应用指数衰减函数表达式拟合, 其相关系数达到 99.59%~99.9%, 能很好地拟合表 1.2 的数据。求出各个参数的平均值, 得到土-水特征曲线方程式为:

$$w = 11.212 + 9.296e^{-s/159.51} \quad (1.3)$$

根据式 (1.2), 当 $\lim_{s \rightarrow \infty} w = B_0$ 时, 质量含水量不再变化而等于一个固定的值, 定义为残余含水量。

当 $s=0$ 时, $w=w_1$, 指初始含水量或饱和含水量; $B_1 = w_1 - B_0$ 。即是在整个吸变化过程中含水量的变化范围。将式 (1.2) 变换后, 得:

$$\ln(w - B_0) = \ln B_1 - s/t \quad (1.4)$$

设 $k=1/t$, 有

$$\ln(w - B_0)/B_1 = -ks \quad (1.5)$$

式中 k ——以 s 为横坐标, $\ln(w - B_0)$ 为纵坐标的坐标系中直线的斜率, 表示含水量减少幅度的自然对数随吸力增大的变化程度。

因此 t 实际上刻画了含水量随吸力变化的量度指标, 定义为含水量衰减常数。 k 越大表示单位吸力的增加而引起含水量减少量越大, k 越小表示单位吸力的增加引起的含水量减少幅度越小, 相应地, t 刚好与 k 意义相反。

3. 一定基质吸力范围内的线性拟合 (李志清等, 2007)

李志清等 (2007) 对湖北省某高速公路膨胀土的室内实测吸湿曲线和野外实测曲线进行了对比。两条曲线的进气值非常接近, 残余含水量也比较接近。因此利用室内吸湿曲线可以代替野外实测曲线, 即可由室内吸湿曲线模拟野外实测曲线, 从而求得非饱和和相关参数。

李志清等 (2007) 将野外实测曲线中基质吸力大于 100kPa 的点绘于图 1.11 中, 从图中可以看出, 当基质吸力在 100 ~ 1000kPa 范围内, SWCC 呈线性, 即在这个范围内只需测定两组基质吸力和含水量值, 便可绘制这个范围内的 SWCC。

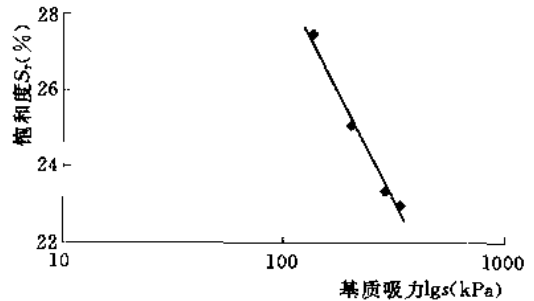


图 1.11 基质吸力和饱和度的线性关系 (李志清等, 2007)

野外基质吸力监测难度较大, 但一般情况下, 当基质吸力在 100~1000kPa 范围内, SWCC 呈线性, 这使得边坡基质吸力监测的可操作性大大提高, 测定两组基质吸力和含水量值, 就可绘制这个范围内的 SWCC。

1.2 干燥与吸湿过程中的土-水特征曲线

1. 干燥与脱湿过程中土-水特征曲线滞回现象

一般认为, 基质吸力随含水量的增大而单调减小。有文献指出基质吸力与含水量并不存在一一对应的单值关系 (Fredlund, 1997)。人们在试验中发现非饱和土在干燥 (脱水) 与脱湿 (吸水) 过程中的土-水特征曲线不重合, 两者之间出现滞回现象, 如图 1.12 所示。这说明, 非饱和土的土-水特征曲线是不稳定的, 它与土体含水量的变化路径有关。

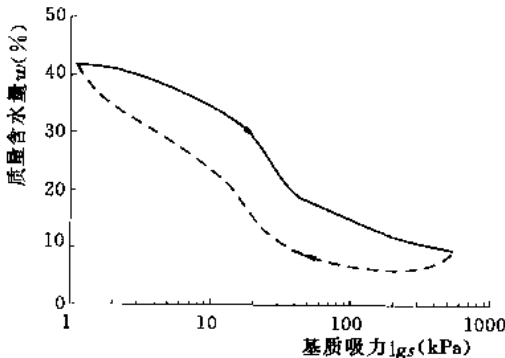


图 1.12 土-水特征曲线的滞回现象

龚壁卫等 (2006) 和叶为民等 (2006) 分别针对湖北枣阳强膨胀土和上海软土开展干燥与吸湿过程的土-水特征曲线试验研究,

得出了相似的结果。

图 1.13 为龚壁卫等 (2006) 针对湖北枣阳强膨胀土试样得出的干-湿循环过程中的土-水特征曲线 SWCC。可看出在脱湿过程中, 当 $w > 31\%$ 的范围内时, 吸力较小, 曲线变化也较平缓 ($w = 31\%$ 时, 液性指数 $I_L = 0.16$, 硬塑状态); 当含水率低于 31% 后, 吸力增加很快, 塑限含水率为 26.7% 时, 吸力达到 700kPa 。在土样从 $w \approx 26\%$ 时开始吸湿的过程中, 随着含水量的增加, 吸力降低, 形成一条新的土-水特征曲线, 与脱湿过程的特征曲线不重合, 两者之间出现不小的滞回差。这说明, 在干-湿循环中, 相同的含水量可以有不同的吸力, 同一个吸力可能对应不同的含水量。

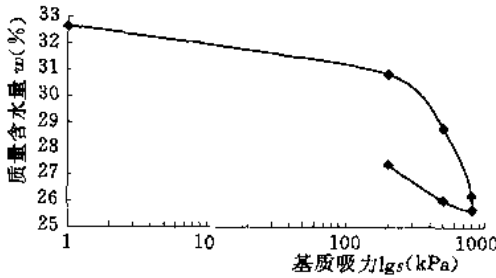


图 1.13 干-湿循环中的土-水特征曲线 (龚壁卫等, 2006)

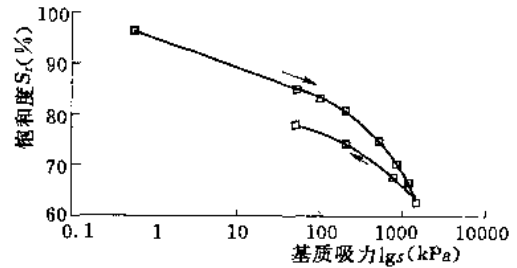


图 1.14 上海软土的土-水特征曲线 (叶为民等, 2006)

图 1.14 是叶为民等 (2006) 针对上海软土开展干燥与吸湿过程的土-水特征曲线试验结果, 由图中可以看出, 上海软土的低吸力部分的干燥 (脱水) 过程和吸湿 (吸水) 过程曲线间存在滞后性。即同温度条件下, 土样的吸湿和脱水过程中土的土-水特征不同, 对一特定的含水量, 干燥过程曲线对应的吸力要高于吸湿过程的吸力。通过以上分析可知, 一条完整的土-水特征曲线应该有干燥和吸湿两个过程, 即反映其回滞现象。

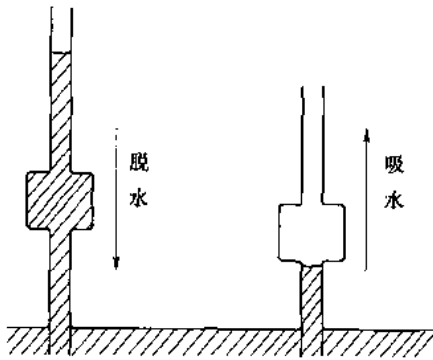


图 1.15 毛细水的瓶颈效应 (李广信, 2004)

不同, 对一特定的含水量, 干燥过程曲线对应的吸力要高于吸湿过程的吸力。通过以上分析可知, 一条完整的土-水特征曲线应该有干燥和吸湿两个过程, 即反映其回滞现象。

2. 土-水特征曲线滞回的原因分析

土的变干和变湿过程具有不同特点, 土-水特征曲线滞回的原因主要有两个方面。

首先, 存在毛细水的“瓶颈效应” (李广信, 2004), 如图 1.15 所示。在脱水过程中, 毛细水柱高度为细管所控制, 在吸水过程中, 毛细水上升高度为大孔隙所阻。土中孔隙大小不均匀, 土变干时, 水不能离开小孔隙, 而变湿时水不易进入大孔隙, 即大孔隙较易进水和脱水, 小孔隙则反之。因此, 在脱水过程中, 空气增多减小了过水断面, 土粒和水靠近, 水土之间相互作用增强, 小孔隙内残留的水使含水量要高于吸水时的含水量。

1.3 非饱和土的理论土-水特征曲线

栾茂田等 (2005) 认为关于土-水特征曲线, 尽管已经有许多学者提出了多种表达式

(D. G. Fredlund, 1994; M. D. Fredlund, 1997; Clapp, 1978), 这些数学模式一般是针对某种特定工程土在某个吸力范围内通过试验拟合直接得到的, 无法从理论上反映土-水特征曲线的本质和基质吸力的作用机理。栾茂田等 (2005) 试着从热力学角度基于理想微观模型对于基质吸力进行理论分析, 本节介绍栾茂田等 (2005) 从理论上得到基质吸力与饱和度之间的关系, 即土-水特征曲线的方法。

1.3.1 基本概念及土-水特征曲线的影响因素

1. 表面张力、润湿和接触角 (栾茂田等, 2005)

气体分子间的作用力很小, 不能维持一个自由表面; 固体分子间的作用力很大, 使得表面的分子与内部分子的受力虽然不同, 但不会产生显著的表面力学现象。对于液体, 表面分子的受力状态不同于内部分子的受力状态, 在液体内部相互作用力表现为压力, 在液体表面, 存在着一种与液面相切而与边界线相垂直的促使液面收缩的力, 称之为表面张力。单位长度截线上的表面张力称为表面张力系数 σ , 用于表达液体的表面特性。影响表面张力系数的因素包括液体成分、温度、相邻物质的化学性质及杂质等。

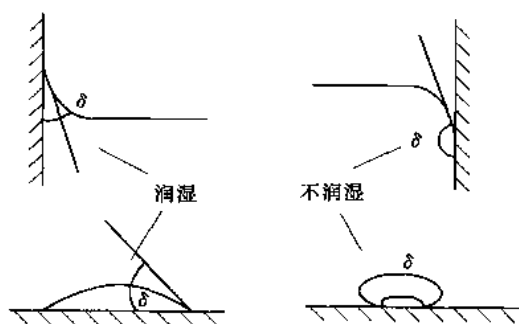


图 1.16 润湿与接触角 (栾茂田等, 2005)

水在玻璃上向四周漫流的现象称为润湿; 而水在石蜡上聚成近似球形的现象称为不润湿。润湿发生的条件取决于液体分子与固体分子间的相互作用力 (附着力) 和液体分子间的相互作用力 (内聚力) 的相对大小。不同液体对不同固体的润湿程度不同,

润湿程度可以用液体表面和固体表面切线通过液体内部所成的夹角 (即接触角 δ) 表示, 如图 1.16 所示。

2. 土-水特征曲线的影响因素 (栾茂田等, 2005)

(1) 土的矿物成分。土的矿物成分包括土颗粒和可溶盐的矿物成分。亲水性较强的矿物所组成的土的吸力较大, 相应的残余含水量较大, 曲线的斜率较平缓。

(2) 孔隙结构。孔隙结构包括孔隙大小、级配和组成结构等。孔隙结构影响土-水作用面积和收缩膜的形状, 收缩膜的形状决定着吸力的大小。土体的孔隙小, 进气值高, 持水性强, 相应的土-水特征曲线平缓。

(3) 土粒的力学性质。土体在外力作用下所表现出的压缩及相应的其他变形, 将改变土的孔隙结构, 进而影响收缩膜形状和土的持水能力, 从而改变土-水特征曲线形状。

(4) 液体的性质。液体的表面张力取决于液体的性质, 从而不仅弯液面的形状及液面内外压力差依赖于液体, 而且液体和固体之间的接触角与液体性质密切相关。

(5) 孔隙气。表面张力和接触角不仅依赖于固体和液体的物理化学性质, 而且依赖于孔隙气的成分和压力。对于非饱和土, 孔隙气或与大气直接相通, 或为水所封闭。

1.3.2 理论土-水特征曲线 (栾茂田等, 2005)

下面从理论上分析球形颗粒间弯液面所应满足的几何条件。设两球半径均为 R , 两者

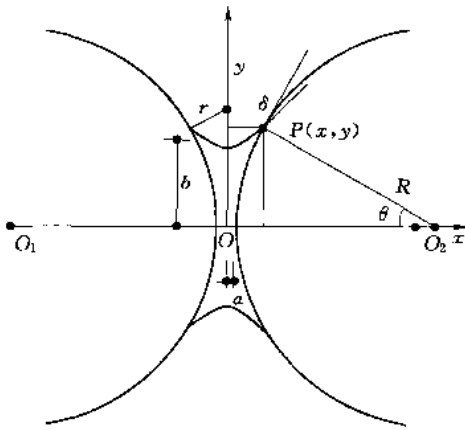


图 1.17 球形颗粒与弯液面的几何关系

之间的间隙为 $2a$ ，相互位置关系如图 1.17 所示，当两球之间的水量较小（环状水）时，忽略其重力作用。这里借用热力学中所采用的一般假定，即假设弯液面的形状为圆弧。在 xOy 平面内，液面是半径为 r 的一段圆弧，点 P 为液面与土颗粒的交点， b 为液面底端的高度，定义为饱和半径， $2(R+a)$ 为球心之间的距离， δ 为水与土颗粒的接触角。则弯液面方程为：

$$x^2 + (y - b - r)^2 = r^2 \quad (1.6)$$

在点 P 处弯液面的切线斜率应与接触角相协调，于是

$$y' = -\frac{x}{y - b - r} = \tan\left(\frac{\pi}{2} - \delta - \arcsin \frac{y}{R}\right) \quad (1.7)$$

同时注意到点 P 位于圆形颗粒的表面，于是

$$(x - R - a)^2 + y^2 = R^2 \quad (1.8)$$

对于点 P ，联立几何条件式 (1.6)、式 (1.7) 和式 (1.8)，从理论上可以确定弯液面的方程。注意到该联立方程组是高度非线性的，无法直接得到其解析解。因此考虑采用迭代法进行数值求解。这里采用下列不动点迭代格式，得：

$$x = \sqrt{2y(b+r) - y^2 - 2br - b^2} \quad (1.9a)$$

$$y = \sqrt{R^2 - (x - a - R)^2} \quad (1.9b)$$

$$r = x \cot\left(\frac{\pi}{2} - \delta - \arcsin \frac{y}{R}\right) - b + y \quad (1.9c)$$

由此可以确定弯液面的几何方程。

下面考虑弯液面上的受力条件。弯曲液面内液面附近的液体压强与液面外的压强存在压强差 $\Delta P = P_B - P_A$ ，形成弯曲液面下的附加压强，是由液体的表面张力产生的，将使液面上下两点 A 、 B 之间产生一个压强突变 ΔP ，如图 1.18 所示。这个压强差的相反数即为非饱和土力学中所定义的基质吸力 $s = -\Delta P$ 。

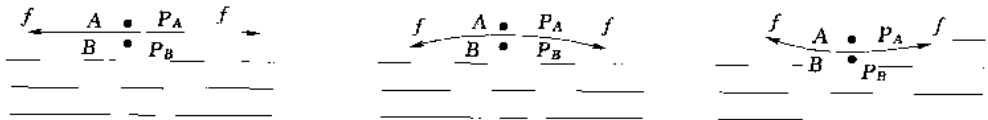


图 1.18 表面张力的作用

根据热力学原理，液面内外的压强差为：

$$\Delta P = \sigma \left(\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} \right) \quad (1.10)$$

式中 R_1, R_2 ——任意一对相互垂直的平面在液面上所截取曲线的曲率半径，如图 1.19 所示。

根据微分几何学,这两条曲线的曲率之和总是不变的。这就是热力学中著名的 Laplace 公式。当确定了颗粒之间弯液面的曲率半径 r 和高度 b 后,考虑到弯液面一个方向上的曲率中心在液面外侧,而另一正交方向上的曲率中心在弯液面内侧,于是 $R_1 = r$, $R_2 = -b$, 将其代入 Laplace 关系式 (1.10) 就可确定基质吸力。

另外,根据式 (1.9) 得出液面的形状以后,可根据几何关系求出单片液体的体积 V_n 及其所润湿的土颗粒表面积 A_n 。由于液体夹在两个球体之间且外侧是圆弧旋转而成,所以求解起来相当复杂。根据由此所确定的液体体积,进而可确定此时的饱和度。从而可以得到基质吸力与饱和度之间的关系,即土-水特征曲线。

上述是栾茂田等 (2005) 从理论上得到的获得基质吸力与饱和度之间的关系,即土-水特征曲线的方法,但是,由于求解的复杂性,该方法还仅仅只是在理论上的一个推导,目前土-水特征曲线的获得依然需要依靠室内或室外试验手段。

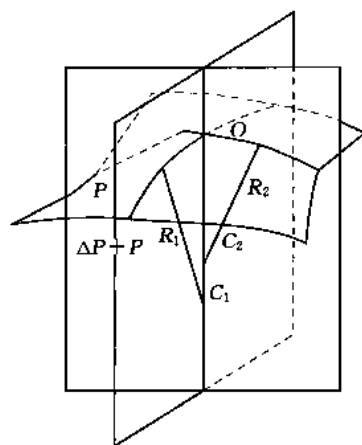


图 1.19 弯液面下的附加压强

参 考 文 献

- [1] 李志清, 李涛, 胡瑞林. 非饱和土水分特征曲线特性 [J]. 中国公路学报, 2007, 20 (3): 23-28.
- [2] 李志清, 胡瑞林, 王立朝, 等. 非饱和膨胀土 SWCC 研究 [J]. 岩土力学, 2006, 27(5): 730-734.
- [3] FREDLUND D G, RAHARDJO H. 非饱和土土力学 [M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 1997.
- [4] 李永乐, 刘汉东, 刘海宁, 等. 黄河大堤非饱和土土-水特性试验研究 [J]. 岩土力学, 2005, 26 (3): 347-350.
- [5] 谈云志, 王世梅. 某滑坡滑带土的土水特征曲线试验研究 [J]. 合肥工业大学学报 (自然科学版), 2007, 30 (3): 298-300.
- [6] 龚璧卫, 周小文, 周武华. 干-湿循环过程中吸力与强度关系研究 [J]. 岩土工程学报, 2006, 28 (2): 207-209.
- [7] 叶为民, 白云, 金麒, 等. 上海软土土水特征的室内试验研究 [J]. 岩土工程学报, 2006, 28 (2): 260-263.
- [8] 李广信. 高等土力学 [M]. 北京: 清华大学出版社, 2004.
- [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.
- [10] Fredlund D G, Xing A. Equations for the soil-water characteristic curve [J]. Canadian Geotechnical Journal, 1994, 31: 521-532.
- [11] Fredlund M D, Wilson G W, Fredlund D G. Prediction of the soil-water characteristic curve from the grain-size distribution curve [A]. Proceeding of the 3rd Symposium on Unsaturated Soil [C]. Brazil, 1997. 13-23.
- [12] Clapp R B, Hornberger G M. Empirical equations for some soil hydraulic properties [J]. Water Resources Research, 1978, 14 (4): 601-604.