



非饱和土水力与力学特性 的物理机制研究

张 昭 刘奉银 著



科学出版社

非饱和土水力与力学特性的 物理机制研究

张 昭 刘奉银 著

科学出版社

北京

内 容 简 介

水力与力学特性是当今非饱和土力学研究的热点和难点之一。本书总结了目前非饱和土持水特性、渗透特性和有效应力的研究现状,基于表面科学、颗粒力学及热力学原理,提出了“土样-土颗粒-集合体”的多层次分析模式,先从土样的试验结果出发,研究了持水曲线的影响因素,并在全含水率范围内完善了对土持水及非饱和渗透特性的模型描述;再将土颗粒简化为球体颗粒,用液桥表征颗粒间的水分形态,提出了土颗粒与液桥相互作用的理论模型;最后,将非饱和土简化为球体颗粒组成的土颗粒集合体或气、液、固3相及其交界面组成的集合体,分别建立了预测滞回持水曲线的物理模型以及考虑相间交界面的有效应力公式,深化了对非饱和土水力与力学特性物理本质的认识。

本书可供土木、水利、公路、市政和工程地质领域的科研和工程技术人员使用,也可作为高等院校研究生和本科学生的教学参考书。

图书在版编目(CIP)数据

非饱和土水力与力学特性的物理机制研究/张昭,刘奉银著. —北京:科学出版社,2015.9

ISBN 978-7-03-045680-9

I. ①非… II. ①张…②刘… III. 土力学-固体颗粒-研究 IV. ①TU4

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2015)第 218638 号

责任编辑:亢列梅 杨向萍 乔丽维/ 责任校对:桂伟利

责任印制:徐晓晨/ 封面设计:红叶图文

科学出版社出版

北京东黄城根北街 16 号

邮政编码:100717

<http://www.sciencep.com>

北京中石油彩色印刷有限责任公司印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2015 年 9 月第 一 版 开本:720×1000 B5

2015 年 9 月第一次印刷 印张:9 1/8

字数:133 000

定价:65.00 元

(如有印装质量问题,我社负责调换)

前 言

非饱和土的水力特性(包括持水特性和渗透特性)与力学特性(有效应力)是土力学界关注的热点课题之一。在大型水利水电、公路、核废料处置等工程建设中,普遍涉及复杂地质环境下水分的分布和迁移对非饱和土体变形和稳定性影响显著的问题:持水特性对非饱和土变形的影响显著,渗透特性是非饱和土体渗流分析的关键环节,有效应力是非饱和土力学特性的核心内容之一,其原理表达形式及其参数确定方法在非饱和土体变形和稳定性分析中至关重要,对这三者的研究是上述各类岩土工程设计和性能评价的基础和关键。由于过去对非饱和土持水特性、渗透特性以及有效应力的研究没有充分揭示其物理机制,因而对岩土工程结构的优化缺乏坚实的物理基础,故岩土工程设计往往得不到优化,造成投资浪费或存在安全隐患。因此,深入认识非饱和土水力与力学特性,是重大工程建设的迫切需求。

要认识水力特性的内在机理,仅通过土样的持水、非饱和和渗透试验研究是不够的,因为不同初始条件下土样的持水特性及渗透特性反映的试验规律适用范围较窄,物理机制不清,而将土样简化为不等径球体颗粒集合体,用液桥表征一对不等径球体颗粒间的水分形态,可以通过研究土颗粒与水的相互作用,对非饱和土的宏观水力特性有更深层次的认识。要认识有效应力的内在机理,归根结底需要搞清非饱和土孔隙中水、气两相流体与土颗粒形成的相间交界面存在的复杂微观作用机制,这种思路似乎更能表征有效应力对土材料宏观变形的贡献。

本书凝聚了作者自硕士至博士阶段在非饱和土水力-力学特性的理论与试验研究领域的研究成果,也为非饱和土持水特性、渗透特性以及有效应力的研究探索出一条新途径。作者及所在课题组针对土样的持水及非饱和渗透试验,在不同固结压力下重塑黄土试样的持水试验基础上,结合已有文献中不同应力历史下的持水试验结果,提出考虑应力

引起孔隙比的持水模型;利用改进的非饱和土水气运动联合测定仪,对不同干密度的重塑黄土试样进行不同增湿级数的非饱和渗透试验,在湿度和密度双变化条件下提出 2 种非饱和黄土渗透函数;针对土颗粒与水相互作用的理论描述,从理论上研究表征不等径粗糙球体颗粒与静态液桥相互作用的微观水力特性的理论模型;用等径球体颗粒组成的均匀土颗粒集合体初步简化非饱和土,提出表征其滞回持水特性的物理模型;将非饱和土简化为气、液、固 3 相及其交界面组成的集合体,列出气、液、固 3 相及其交界面的守恒方程以考虑其热力学特性,进而在本构假定中考虑力-水耦合特性,分别推导土颗粒呈刚性和可变形时考虑相间交界面的非饱和土有效应力公式。作者主持和参与了多项国家自然科学基金项目、中国博士后科学基金项目和其他科研项目。希望本书的出版能够起到抛砖引玉的作用,为更复杂非饱和土力学问题的宏-微观理论与试验研究打下基础。

本书内容涉及非饱和土力学领域中水力-力学特性的物理机制,共 6 章:第 1 章,绪论(张昭);第 2 章,密度、干湿循环、孔隙尺寸分布和应力对土样持水特性的影响(张昭);第 3 章,土样在全含水率范围内持水及非饱和渗透特性的模型描述(张昭);第 4 章,土颗粒与液桥相互作用的微观持水特性(刘奉银);第 5 章,均匀土颗粒集合体滞回持水特性的物理模型(张昭);第 6 章,气、液、固及其交界面集合体的有效应力公式研究(张昭)。

本书的部分研究成果得到了国家自然科学基金项目(41372304、41402258)和中国博士后科学基金项目(2015M572657XB)资助,在此表示衷心的感谢。特别感谢中国人民解放军后勤工程学院的陈正汉教授、西安理工大学的谢定义教授和李宁教授为本书提出了宝贵的建议。同时感谢周冬、赵旭光、朱良、王磊等在本书编排、整理和校阅过程中所付出的辛勤劳动。

由于作者水平有限,书中难免有不当之处,敬请读者批评指正。

作者

2015 年 6 月于西安理工大学

目 录

前言

第 1 章 绪论	1
1.1 非饱和土水力-力学特性的物理机制问题的研究背景	1
1.2 持水曲线及其影响因素的研究现状	3
1.2.1 持水曲线的模型描述	4
1.2.2 干湿循环的影响——以滞回特性为研究对象	8
1.2.3 颗粒组成的影响	11
1.3 非饱和渗透特性的模型描述	13
1.4 土颗粒与水相互作用的理论描述、试验研究及数值模拟	14
1.5 非饱和土有效应力的公式描述	16
1.6 “土样-土颗粒-集合体”多层次分析模式的提出	18
1.6.1 多层次分析模式的研究目标	18
1.6.2 多层次分析模式的研究内容	19
1.6.3 多层次分析模式的独到之处	21
参考文献	22
第 2 章 密度、干湿循环、孔隙尺寸分布和应力对土样持水特性的影响	32
2.1 初始干密度和干湿循环对黄土持水曲线的影响	33
2.1.1 试验用土、仪器及方案	33
2.1.2 试验结果分析及讨论	35
2.2 颗粒级配、初始干密度和应力对持水曲线“滞回度”的影响	39
2.2.1 试验用土、仪器及方法	39
2.2.2 试验与研究方案	40
2.2.3 对青藏黏土、全风化花岗岩和火山土的试验结果分析	41

2.3 利用土的孔隙尺寸分布预测持水曲线的方法 47

 2.3.1 预测思路 47

 2.3.2 预测结果分析 48

2.4 考虑应力引起孔隙比变化的持水曲线模型 54

 2.4.1 试验用土、仪器及研究方案 54

 2.4.2 对 Saskatchewan 粉土、Indian Head 冰碛土和西安黄土的
 试验结果分析 56

 2.4.3 考虑应力引起孔隙比变化的持水曲线模型的推导思路 59

 2.4.4 模型的试验验证 61

2.5 本章小结 64

参考文献 66

第 3 章 土样在全含水率范围内持水及非饱和渗透特性的模型描述 68

3.1 全含水率范围内持水特性的模型描述 68

 3.1.1 表征较高含水率范围内持水特性的传统模型 68

 3.1.2 建立表征全含水率范围内持水特性的修正模型 69

 3.1.3 门槛基质吸力和门槛体积含水率的确定 69

3.2 全含水率范围内非饱和渗透特性的模型描述 71

 3.2.1 表征毛细流动对非饱和渗透贡献的传统模型 71

 3.2.2 表征薄膜流动对非饱和渗透贡献的修正模型 72

 3.2.3 建立表征全含水率范围内非饱和渗透特性的组合模型 73

3.3 模型的验证与讨论 73

 3.3.1 修正持水曲线模型的试验验证 74

 3.3.2 修正(组合)非饱和渗透系数模型的试验验证 77

3.4 本章小结 81

参考文献 82

第 4 章 土颗粒与液桥相互作用的微观持水特性 83

4.1 不等尺寸土颗粒间液桥的形状和受力分析 84

 4.1.1 充填角和固-液交界面的控制半径 84

 4.1.2 液桥体积的计算 85

4.1.3 基质吸力的无量纲表达式	86
4.1.4 毛细作用力的无量纲表达式	86
4.2 理论模型的计算结果分析、讨论及验证	87
4.2.1 矿物成分相同的土颗粒间无量纲的液桥体积与毛细作用力	87
4.2.2 矿物成分不同的土颗粒间无量纲的液桥体积与毛细作用力	89
4.2.3 土颗粒间水分与水蒸气的平衡	90
4.2.4 理论模型的验证——表征球体颗粒间液桥毛细作用力与其 间距的关系	92
4.3 本章小结	94
参考文献	94
第5章 均匀土颗粒集合体滞回持水特性的物理模型	96
5.1 土颗粒集合体物理模型的理论基础	96
5.1.1 两个相切接触的等径球体颗粒间毛细水的形态和受力	96
5.1.2 等径球体颗粒集合体的增湿过程	97
5.1.3 等径球体颗粒集合体内的体积关系	97
5.2 表征均匀土颗粒集合体滞回持水曲线的物理模型	99
5.2.1 对边界增湿过程的模拟	99
5.2.2 对边界减湿过程的模拟	103
5.2.3 对第1次扫描减湿过程的模拟	106
5.2.4 对第1次扫描增湿过程的模拟	107
5.2.5 对再次扫描增湿和减湿过程的模拟	109
5.2.6 模型中参数的确定	110
5.3 模型的验证	111
5.4 本章小结	117
参考文献	118
第6章 气、液、固及其交界面集合体的有效应力公式研究	119
6.1 有效应力公式的推导	119
6.1.1 各相及其交界面的守恒方程	119

6.1.2	在 Helmholtz 自由能中考虑力-水耦合特性	123
6.1.3	气、液、固及其交界面集合体的有效应力公式	124
6.2	有效应力参数的确定	129
6.3	有效应力公式的验证	131
6.4	本章小结	136
	参考文献	137
	附录 A 非饱和土中水分的吸力	138
	附录 B 非饱和土中水分的吸力	139
	附录 C 非饱和土中水分的吸力	140
	附录 D 非饱和土中水分的吸力	141
	附录 E 非饱和土中水分的吸力	142
	附录 F 非饱和土中水分的吸力	143
	附录 G 非饱和土中水分的吸力	144
	附录 H 非饱和土中水分的吸力	145
	附录 I 非饱和土中水分的吸力	146
	附录 J 非饱和土中水分的吸力	147
	附录 K 非饱和土中水分的吸力	148
	附录 L 非饱和土中水分的吸力	149
	附录 M 非饱和土中水分的吸力	150
	附录 N 非饱和土中水分的吸力	151
	附录 O 非饱和土中水分的吸力	152
	附录 P 非饱和土中水分的吸力	153
	附录 Q 非饱和土中水分的吸力	154
	附录 R 非饱和土中水分的吸力	155
	附录 S 非饱和土中水分的吸力	156
	附录 T 非饱和土中水分的吸力	157
	附录 U 非饱和土中水分的吸力	158
	附录 V 非饱和土中水分的吸力	159
	附录 W 非饱和土中水分的吸力	160
	附录 X 非饱和土中水分的吸力	161
	附录 Y 非饱和土中水分的吸力	162
	附录 Z 非饱和土中水分的吸力	163
	参考文献	164
	索引	165
	参考文献	166
	参考文献	167
	参考文献	168
	参考文献	169
	参考文献	170
	参考文献	171
	参考文献	172
	参考文献	173
	参考文献	174
	参考文献	175
	参考文献	176
	参考文献	177
	参考文献	178
	参考文献	179
	参考文献	180
	参考文献	181
	参考文献	182
	参考文献	183
	参考文献	184
	参考文献	185
	参考文献	186
	参考文献	187
	参考文献	188
	参考文献	189
	参考文献	190
	参考文献	191
	参考文献	192
	参考文献	193
	参考文献	194
	参考文献	195
	参考文献	196
	参考文献	197
	参考文献	198
	参考文献	199
	参考文献	200

第 1 章 绪 论

1.1 非饱和土水力-力学特性的物理机制问题的研究背景

水力-力学特性(包括持水特性、水分的流动特性和有效应力)是非饱和土力学理论与工程的重要课题之一。在大型水利水电、公路、核废料处置等与岩土体有关的工程建设中,普遍涉及复杂地质环境下水分的分布和迁移对非饱和土体变形和稳定性影响显著的问题。例如,在暴雨诱发滑坡、泥石流等地质灾害中,雨水入渗会使土坡内部的水分发生运动且重分布,导致坡体的有效应力场发生变化,引起土坡发生变形,甚至诱发滑带的形成和贯通;在水利水电工程中,土石坝的黏土心墙孔隙中水分的运动也会显著影响黏土心墙的沉降变形过程。究其机理可知,持水特性对非饱和土变形的影响显著,即使外荷载相同,湿度(如饱和度)的变化也会显著影响土材料的刚度(Sun et al., 2010);水分的流动特性(渗透特性)是非饱和土体渗流分析的关键环节;有效应力反映了对土骨架变形的贡献,其原理表达形式及其参数确定方法至关重要。由于过去对非饱和土持水特性、渗透特性以及有效应力的研究没有充分揭示其物理机制,故岩土工程设计往往因缺乏坚实的物理基础而得不到优化,造成投资浪费或存在安全隐患。因此,深入认识非饱和土水力-力学特性的内在机理,是重大工程建设的迫切需求。

要认识水力-力学特性的内在机理,仅通过土样的持水、非饱和渗透试验、非饱和三轴试验研究是不够的,因为不同初始条件下土样的持水特性、流动特性、力学特性反映的试验规律适用范围较窄,物理机制不清,而将土样简化为不等径球体颗粒集合体,用液桥表征一对不等径球体颗粒间的水分形态(图 1.1),可以通过研究土颗粒与水的相互作用,对非饱和土的宏观水力特性有更深层次的认识。此外,非饱和土孔隙中的水、气两相流体与土颗粒形成的相间界面存在复杂的微观作用

机制,研究气、液、固 3 相及其交界面组成的集合体的有效应力,似乎更能表征其对土骨架宏观变形的贡献。

为此,可采用“土样-土颗粒-集合体”的多层次分析模式(图 1.1),将土样试验的模型修正、土颗粒与水相互作用的理论描述、集合体的简化组装相结合,研究基质吸力对“土样-土颗粒-集合体”水力-力学特性的作用机制。对土颗粒利用表面科学,对土样分别采用土颗粒集合体和气、液、固 3 相及其交界面的集合体模拟,利用颗粒力学和热力学开展研究,不仅能深化和完善对非饱和土水力-力学特性的内在机理认识,也可为非饱和土持水特性、渗透特性以及有效应力的研究探索出一条新途径。

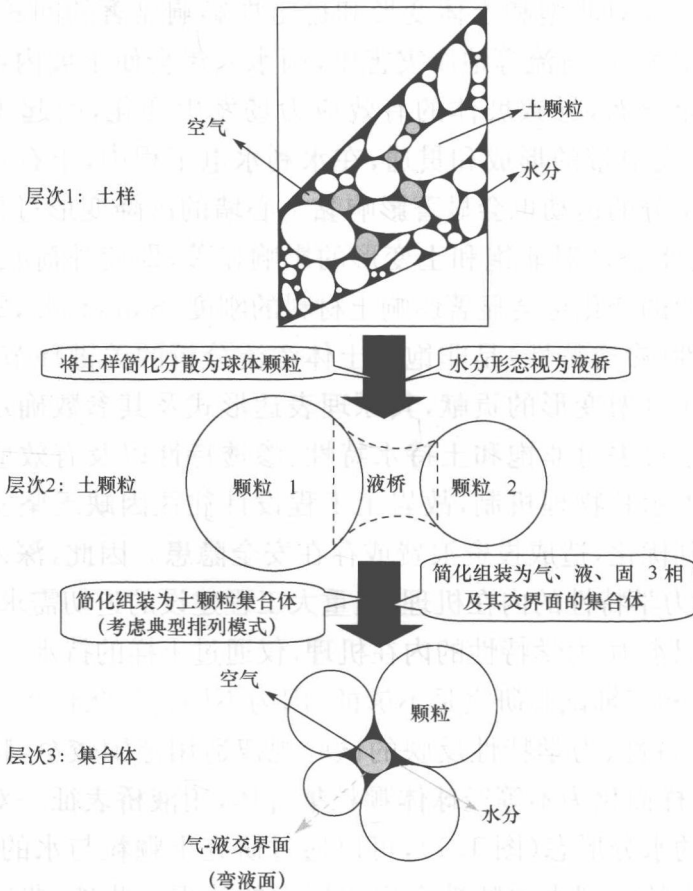


图 1.1 “土样-土颗粒-集合体”的多层次分析模式

1.2 持水曲线及其影响因素的研究现状

持水曲线可应用于模拟非饱和渗透规律(Fredlund et al., 1993)、非饱和抗剪强度(Vanapalli et al., 1996)、土体内水分迁移(Barbour, 1998)以及土中含水状态的变化对其力学性质的影响等(Fredlund, 2000; Lim et al., 1998),其在非饱和土力学中的地位类似于压缩曲线在饱和土力学中的地位(Rahardjo et al., 1997)。

典型的持水曲线(图 1.2)存在两个特征点:一是土的进气值 ψ_{aev} ,即空气开始进入土中最大孔隙时对应的基质吸力,此时土开始大量排水;二是土的残余状态点(残余体积含水率 θ_r 或残余饱和度 S_{rr} 以及残余吸力 ψ_r)的点,当土中湿度随着基质吸力的增加而降低至该值时,湿度的继续减小需更大的基质吸力,通过残余状态点后,土继续排水所需的基质吸力急剧增大,土的湿度为零时,对应的最大基质吸力 $\psi_{\text{max}} \approx 10^6 \text{ kPa}$ (完全干燥点)(Pham, 2005; Vanapalli et al., 1999; Fredlund et al., 1993)。

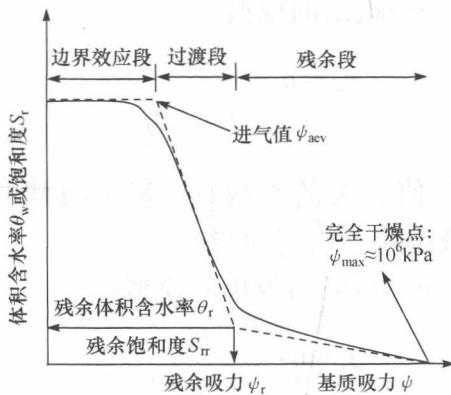


图 1.2 典型的持水曲线

以进气值和残余状态点为分界点,可将持水曲线分为 3 个典型区段(Vanapalli et al., 1999),各个区段分别对应非饱和土中不同的水汽状态:第一区段即图 1.2 中的边界效应段,该区段中土内的水量变化很小,而气相仅能以封闭的气泡状态存在于水中,此时土体的性质接近于

饱和土的性质；当土的基质吸力增至进气值时，进入第二区段，称为过渡段，此区段的水汽通道状态呈双开敞，土随着基质吸力的增大，其内部的大孔隙开始进气并逐渐被孔隙所占据，此时土中的自由水开始大量排出，故此区段中土的性质变化最大；第三区段即图 1.2 中的残余段，此阶段中土的水量随其基质吸力增大而逐渐趋于稳定。

1.2.1 持水曲线的模型描述

土壤学和岩土工程领域的学者从土样的持水试验结果出发，利用试验分析和理论推导等手段较为系统地研究了持水特性的模型描述，主要有以下 6 种模型。

1. 经验模型

Gardner(1958)、Van Genuchten(1980)以及 Brooks 等在分析了不同种土的持水试验规律后提出[Huang(1994)详述了 Brooks 等在 1964 年发表的研究成果]，以体积含水率 θ_w 为变量， θ_r 为残余体积含水率， θ_s 为饱和体积含水率。

(1) Gardner(1958)提出的模型：

$$\theta_w = \theta_r + \frac{\theta_s - \theta_r}{1 + \left(\frac{\psi}{a_G}\right)^{n_G}} \quad (1.1)$$

式中， a_G 表示与进气值有关的参数； n_G 表示与减湿率 λ (持水曲线在图 1.2 中过渡段的减湿速率)有关的参数。

(2) Van Genuchten(1980)提出的模型：

$$\theta_w = \frac{\theta_s}{\left[1 + \left(\frac{\psi}{a_V}\right)^{n_V}\right]^{m_V}} \quad (1.2)$$

式中， a_V 表示与进气值有关的参数； n_V 表示与减湿率 λ 有关的参数； m_V 表示与残余体积含水率 θ_r 有关的参数。

(3) Brooks 等(Huang, 1994)提出的模型：

$$\theta_w = \theta_r + (\theta_s - \theta_r) \left(\frac{\psi_{aeV}}{\psi}\right)^\lambda \quad (1.3)$$

2. 半经验模型

Fredlund 等(1994)和 Kosugi(1996, 1994)基于不同种土的孔隙尺寸统计规律提出了相应的半经验模型。

(1) Fredlund 等(1994)提出的模型(以体积含水率 θ_w 为变量, ψ_r 为残余吸力):

$$\theta_w = C(\psi) \frac{\theta_s}{\left\{ \ln \left[\exp(1) + \left(\frac{\psi}{a_F} \right)^{n_F} \right] \right\}^{m_F}} \quad (1.4)$$

式中, a_F 表示与进气值有关的参数; n_F 表示与减湿率 λ 有关的参数; m_F 表示与残余含水率 θ_r 有关的参数; $C(\psi)$ 表示与残余吸力 ψ_r 有关的参数:

$$C(\psi) = 1 - \frac{\ln \left[1 + \frac{\psi}{\psi_r} \right]}{\ln \left[1 + \frac{1000000}{\psi_r} \right]} \quad (1.5)$$

若不考虑残余吸力 ψ_r , 则 $C(\psi) = 1$ 。

(2) Kosugi(1996, 1994)提出的模型[以有效饱和度 S_r^e 为变量, $S_r^e = (\theta_w - \theta_r) / (\theta_s - \theta_r)$]:

$$S_r^e = \begin{cases} \frac{1}{2} \operatorname{erfc} \left[\frac{\ln \left(\frac{\psi - \psi_{aev}}{\psi_i - \psi_{aev}} \right) - \sigma^2}{\sqrt{2}\sigma} \right], & \psi > \psi_{aev} \\ 1, & \psi \leq \psi_{aev} \end{cases} \quad (1.6)$$

式中, ψ_i 表示过渡段持水曲线反弯点处的基质吸力; 无量纲参数 σ 表示基质吸力分布的标准差。随后, Hwang 等(2003)通过引入砂土粒径与其孔径的经验关系, 对 Kosugi(1996, 1994)提出的模型进行了修正。

3. 理论模型

Frydman 等(2009)基于 Baker 等(2009)提出的黏土表面吸附水分原理, 基于吸附势提出的模型考虑了土类的影响; 栾茂田等(2005)、李顺群(2006)、杨松(2011)、Yang 等(2012)以等径球体颗粒或其组成的

集体为研究对象,提出的模型分别考虑了基质吸力有效作用面积和固-液接触角的影响。

(1) Frydman 等(2009)提出的模型(以重量含水率 w 为变量):

$$\psi = -10^6 \left[\frac{A\rho_w^3}{6\pi} \right] \left[\frac{S_a}{w} \right]^3 = \left[\frac{10^{-5}}{\pi} \right] \left[\frac{S_a}{w} \right]^3 \quad (1.7)$$

式中, A 表示 Hamaker 常数,且由文献(Or et al., 1999)可知, $A = -6 \times 10^{-20} \text{ J}$; ρ_w 表示 4°C 时纯水的密度,且 $\rho_w = 1 \text{ g/cm}^3$; S_a 表示土中矿物成分的比表面积, m^2/kg 。

(2) 栾茂田等(2005)、李顺群(2006)提出的模型(以饱和度 S_r 为变量):

$$\begin{cases} S_r = \frac{V_w(\text{等径球体颗粒间吸附的液体体积})}{V_v(\text{一定颗粒排列模式的孔隙体积})} \\ \psi^e = \psi \frac{A_e}{A} \end{cases} \quad (1.8)$$

式中, ψ^e 表示等效基质吸力 kPa ; A_e 表示基质吸力有效作用面积, m^2 ; A 表示土颗粒总表面积 m^2 。

(3) 杨松(2011)、Yang 等(2012)提出的模型(以重量含水率 w 为变量):

$$\psi = \left\{ \frac{\cos(A+Bw)}{C[1-\cos(A+Bw)]} \right\}^m \quad (1.9)$$

式中, A 、 B 表示与进气值对应的含水率 w_s 和残余含水率 w_r 有关的参数:

$$A = \frac{\pi w_r}{2(w_r - w_s)}, \quad B = \frac{\pi}{2(w_s - w_r)} \quad (1.10)$$

C 表示平均颗粒直径; m 表示土颗粒尺寸量级的指数。

4. 考虑孔隙比和应力的模型

已有试验表明(Tarantino et al., 2005; Miller et al., 2002; Sugii et al., 2002),土样的变形对基质吸力有贡献,而其孔隙比会显著影响持水曲线。为此,学者(周葆春等, 2011; Gallipoli et al., 2003; Karube et al., 2001; Kawai et al., 2000; Romero et al., 2000; Al-Mukhtar et al., 1999;

Vanapalli et al. ,1999; Huang, 1994) 以持水曲线的控制参数(进气值 ψ_{aev} 、减湿率 λ 及残余体积含水率 θ_r 或残余饱和度 S_{rr})为研究“桥梁”,引入孔隙比的影响以改进传统模型[如 Van Genuchten(1980)和 Fredlund 等(1994)提出的模型],如表 1.1 所示。

表 1.1 已参阅文献中关于孔隙比对持水曲线影响的研究成果

研究“桥梁”	孔隙比对持水曲线的影响规律	试验用土	参阅文献
ψ_{aev}	随孔隙比呈幂函数规律变化	粉土、 粉质黏土、 低塑性黏土、 高岭土	Huang(1994)、 Kawai 等(2000)、 Romero 等(2000)、 Karube 等(2001)、 Gallipoli 等(2003)
	随孔隙比呈椭圆曲线规律变化	弱膨胀土	周葆春等(2011)
θ_r 或 S_{rr}	当基质吸力较高时不受孔隙比影响	含黏砂土、 低塑性黏土、 黏土、 弱膨胀土和蒙脱土	Vanapalli 等(1999)、 Al-Mukhtar 等(1999)、 Romero 等(2000)、 Karube 等(2001)、 周葆春等(2011)
λ	不受孔隙比影响	低塑性土和 弱膨胀土	Romero 等(2000)、 周葆春等(2011)
	随孔隙比的增大略微递减	高塑性土	Miller 等(2002)
	用 λ 与 ψ_{aev} 的线性关系推得其与孔隙比的关系	黏土	Karube 等(2001)
体缩曲线	与修正 Kovács 模型参数建立关系	高塑性土	Mbonimpa 等(2006)

此外,应力因其对土样孔隙比的改变也对持水曲线存在显著影响(Thu et al. ,2007;Lai,2004;Ng et al. ,2000a;Ng et al. ,2000b),陈正汉(1999)、黄海等(2000)、方祥位等(2004)对不同初始孔隙比和含水率的重塑黄土试样进行了常基质吸力下不同试验条件下的三轴排水剪切试验,提出了考虑净平均应力和偏应力影响的持水模型(以重量含水率 w 为变量):

$$w = w_0 - a_1 p - b_1 \ln \left[\frac{\psi + p_{atm}}{p_{atm}} \right] \quad (1.11a)$$

$$w = w_0 - a_1 p - b_1 \ln \left[\frac{\psi + p_{atm}}{p_{atm}} \right] - c_1 q \quad (1.11b)$$

式中, a_1 、 b_1 和 c_1 均为常数, 可由与净平均应力、偏应力相关的水的切线体积模量 K^{wpt} 、 K^{wqt} 以及 e_0 确定。

5. 基于颗粒级配曲线的统计预测模型

Arya 等(1981)、Haverkamp 等(1986)、Tyler 等(1989)、Fredlund 等(2002)、Aubertin 等(2003)、Chiu 等(2012)利用对土较易测定的颗粒级配曲线提出了预测持水曲线的统计模型。

6. 低含水率范围的模型

Campbell 等(1992)改进了 Van Genuchten 模型(1980)对低体积含水率范围实测数据的预测精度; Rossi 等(1994)提出了两个持水模型以拟合从饱和到完全干燥的全体积含水率范围实测数据; Fayer 等(1995)和 Khlosi 等(2006)引入在全对数坐标系内与基质吸力 ψ 呈线性关系的变量来替换常残余体积含水率, 分别改进 Van Genuchten(1980)和 Kosugi(1996, 1994)提出的持水模型在较低体积含水率范围内的适用性。

1.2.2 干湿循环的影响——以滞回特性为研究对象

大量试验研究(Gallage et al., 2010; Ho, 2007; Ho et al., 2007; Ho et al., 2006; Pham et al., 2005; Pham, 2005; Lai, 2004; Lu et al., 2004; Yang et al., 2004; Ng et al., 2000a; Talsma, 1970; Topp, 1969; Poulou-vassilis, 1962)表明, 非饱和土在干湿循环下测得的持水曲线存在显著的滞回特性, 而这种现象对研究非饱和土水力-力学特性至关重要(Wheeler et al., 2003; Mualem, 1973), 可用边界和扫描滞回持水曲线来描述。典型的边界和扫描滞回持水曲线(以体积含水率 θ_w 为变量)如图 1.3 所示, 由图可知, 边界减湿曲线表示土从基质吸力 $\psi \approx 0$ 时的体积含水率 θ_w^0 减湿至最大基质吸力 ψ_{\max} ($\psi_{\max} \approx 10^6$ kPa)的曲线, 边界增湿曲线表示土从 ψ_{\max} 增湿至 $\psi \approx 0$ 的曲线, 扫描减湿曲线表示土沿边界增湿曲线增湿至某一体积含水率 θ_w^1 ($0 < \theta_w^1 < \theta_w^0$)后再开始减湿的曲线, 扫描增湿曲线表示土沿边界减湿曲线减湿至某一体积含水率 θ_w^2 ($0 < \theta_w^2 < \theta_w^0$)后开始增湿的曲线。