

毛乌素沙漠风积砂 岩土力学特性及工程应用研究

王治军 李喜安 宋焱勋 何 军 著

地 质 出 版 社

TU4
2012/0

阅 览

毛乌素沙漠风积砂岩土力学 特性及工程应用研究

王治军 李喜安 宋焱勋 何 军 著



地质出版社

· 北 京 ·

内 容 提 要

本书首先在对毛乌素沙漠自然地理及地质环境条件进行全面研究的基础上,首先对毛乌素沙漠风积砂的级配特点、微结构、密度、含水量等物理特性及压缩特性、击实特性、强度特性等岩土力学性质进行了研究。其次通过改进常规三轴试验设备实现了三轴拉伸应力路径试验,并对该应力路径下应力-应变-强度关系进行了研究,通过相关试验数据确定了D-C非线性弹性本构模型和剑桥本构模型的相关参数。再次,开展了毛乌素沙漠风积砂基于状态的弹塑性本构及其相关的本构参数研究。在固结不排水(CU)和固结排水(CD)动三轴试验基础上,对毛乌素沙漠风积砂的动力特性进行了研究,并在此基础上建立了毛乌素沙漠风积砂的等效黏弹性本构和残余应变模型。开展了毛乌素沙漠风积砂地基承载力试验工作,研究了毛乌素沙漠风积砂地基的持力特性以及风积砂地层碎石桩、砂桩及水泥搅拌桩桩体及复合地基的承载力特性,为毛乌素沙漠风积砂地基设计和施工实践提供了重要的试验依据。

本书可供工程地质学、岩土工程学、地基工程、水土保持、环境保护等领域的科研技术人员及高等院校师生参阅、参考。

图书在版编目(CIP)数据

毛乌素沙漠风积砂岩土力学特性及工程应用研究/
王治军等著. —北京:地质出版社, 2011.8
ISBN 978-7-116-07363-0

I. ①毛… II. ①王… III. ①毛乌素沙地—风积土—
岩土力学—研究②毛乌素沙地—砂土地基—基础(工程)—
研究 IV. ①TU4

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2011)第 178056 号

责任编辑:李惠娣

责任校对:王素荣

出版发行:地质出版社

社址邮编:北京海淀区学院路 31 号, 100083

咨询电话:(010) 82324508(邮购部);(010) 82324514(编辑室)

网 址: <http://www.gph.com.cn>

电子邮箱: zbs@gph.com.cn

传 真:(010) 82324340

印 刷:北京天成印务有限责任公司

开 本: 787mm×1092mm ¹/₁₆

印 张: 17.25

字 数: 420 千字

印 数: 1—500 册

版 次: 2011 年 8 月北京第 1 版

印 次: 2011 年 8 月北京第 1 次印刷

定 价: 60.00 元

书 号: ISBN 978-7-116-07363-0

(如对本书有建议或意见,敬请致电本社;如本书有印装问题,本社负责调换)

前 言

中国沙漠的总面积约为 $130 \times 10^4 \text{ km}^2$ ，是当前世界上沙漠最多的国家之一。沙漠区主要分布在我国的西北部，总体上达到全国陆地总面积的 13%，其中以荒漠、半荒漠地带（干旱区）的沙质荒漠占绝大多数，约为沙漠总面积的 84.5%。在区域分布上，主要分布以新疆、甘肃、青海、宁夏及内蒙古西部等地为主^[1,2]。干草原地带（半干旱区）的沙地约占 15.5%（面积约为 11.5 km^2 ），其主要分布区包括内蒙古东部、陕西北部，以及辽宁、吉林和黑龙江三省的西部等地。

毛乌素沙漠是我国 12 大沙漠和沙区之一，面积约为 73344 km^2 。其位置处于内蒙古鄂尔多斯高原向陕北黄土高原的过渡区内，行政范围主要为内蒙古鄂尔多斯市，陕北榆林和宁夏东北部，包括内蒙古自治区鄂尔多斯市的南部（伊金霍洛旗南部、乌审旗全部、鄂托克前旗东南部、鄂托克旗东南部），陕西榆林地区的北部（神木、榆林、横山、靖边、定边、佳县）以及宁夏回族自治区盐池县的东北部。其中内蒙古大约占其面积的 80%，陕西大约占 15%，宁夏大约占 5%。该区现有人口为 1.33×10^6 人，其中农业人口为 1.17×10^6 人，农村劳力为 4.27×10^5 人，人口密度为 34 人/ km^2 ，相对稀少。该地区为不同自然带的交接地段，自然条件恶劣，交通相对不便，然而却拥有十分丰富的资源，如煤、石油、天然气、盐和高岭土等 8 类 40 余种矿产资源^[3]，尤其在油气资源方面具有得天独厚的条件，因此目前已经被列为长庆油田的重点开发地。目前，长庆油田开发的油气资源主要分布在毛乌素沙漠地区，这里有着雄厚的油气资源基础，是我国重要的石油天然气基地，也是西气东输工程的“第一气源地”，这也使得长庆气田一跃成为我国迄今发现的最大整装式大气田。截至 2005 年探明石油资源量已达 $80 \times 10^8 \text{ t}$ ，天然气资源量 $10 \times 10^{12} \text{ m}^3$ ，拥有 4 个储量上千亿立方米的大气田，已实现向北京、天津、上海、西安、石家庄、银川、呼和浩特等大中城市输气。随着西气东输管道、陕-京输气管道、靖-宁输气管道、靖-西输气管道等长输管道的陆续建设，长庆气田已经进入了一个大规模勘探开发阶段，2003 年被国家列为战略储备性油气田，尤其是西气东输工程的启动，苏里格大气田的勘探发现，给长庆气田的勘探开发带来前所未有的发展机遇，气田规模不断扩大，已成为全国天然气枢纽中心。

同时，毛乌素沙漠也是我国沙漠化最严重的地区之一，沙漠化过程导致耕地和草

场普遍风蚀粗化或为流沙所侵占,居民点、交通、水利工程及其他农牧业设施遭受风沙危害十分严重,土地生物产量降低,土地生产潜力衰退,最终导致可利用土地资源的丧失,对该地区的经济发展和人民生活造成严重后果,同时也使生态平衡遭受破坏,自然环境趋于恶化。独特的自然地理条件决定了该区自然灾害普遍而严重,也决定了毛乌素沙漠地区的工程地质条件较为复杂,在工程实践中不可避免地会遇到各种各样的岩土工程问题和工程地质问题。近年来,随着鄂尔多斯盆地油气资源的不断勘探和开发,工程技术人员在毛乌素沙漠风积砂地区工程建设中遇到的技术难题越来越多。

与其工程地质条件的复杂性不相适应的是,对该区风积砂力学特性及风积砂地层工程地质性质方面的理论研究十分缺乏。截至目前为止,尚缺乏对该区风积砂力学性质较为系统的研究,尚未得出适用于描述毛乌素沙漠风积砂应力-应变关系的静力本构模型,这一现状已成为该区关于风积砂有限元计算等方面的客观障碍。而当风积砂地基受到地震荷载或者由天然气压缩机等动力机械产生的动荷载时,需要研究其动力特性,以确定地基在强度和变形两个方面是否能满足设计要求。目前,对毛乌素沙漠风积砂动力学特性的研究基本处于空白状态,严重制约了油田地面工程建设的发展。因此,研究动荷载作用下毛乌素沙漠风积砂地基的动力特性对于动力地基的选址、设计、强度变形计算以及地基处理都具有非常重要的理论和工程实际意义。而另一方面,虽然各类复合地基已在该区得到十分广泛的应用,但相应的理论研究却十分薄弱,这一现状也在很大程度上制约着该区的各类工程建设。随着长庆油田的大规模发展,油田建设突飞猛进,每年投资数十亿元在该地区进行大量的产能建设和矿区建设工程,使得工程实践进展快速与理论研究相对滞后的矛盾越来越突出。如何解决这一突出矛盾,从深层次上认识、利用风积砂以及天然风积砂地基的性质,更加有效地服务于工程实践,是长庆油田持续快速协调发展的迫切需要,也是沙漠区域和周边市县村镇发展的迫切需要。该问题已成为关系到长庆油田建设和地方经济发展十分重要的课题。

在此背景下,西安长庆科技工程有限责任公司于2007年11月专门立项,开展“毛乌素沙漠岩土工程及工程应用”攻关研究,筹集专项资金,组建精干研究团队,由西安长庆科技工程有限责任公司与长安大学密切合作,历时三年,圆满完成课题研究任务。

项目在该区域自然地理及地质环境条件进行全面总结的基础上,针对风积砂的力学特性及风积砂地基承载力特性开展了一系列室内外相关试验研究,重点围绕毛乌素沙漠风积砂的基本物理力学特性、毛乌素沙漠风积砂的静力本构模型、风积砂地基的动力本构模型及风积砂地基的承载力特性进行了研究。同时,开展了以风积砂为细骨料的砂浆试验和灰-砂-土垫层的最优配比重型击实试验,对毛乌素沙漠风积砂工程

适用性进行了研究。其研究成果不仅服务于毛乌素沙漠地区工业与民用建设工程的勘察、设计和施工，而且对其他沙漠地区各类工程实践具有重要的参考指导价值。

本书是项目主要研究成果的总结和升华，研究成果是课题组人员集体智慧的结晶。本课题主要负责人：王治军，李喜安；研究人员：宋焱勋，何军、邓亚虹，耿生明，林鸿州，杜志伟，张德媛、槐东升，李荣建，骆建文，屈雅安，李亮，陈文军，李邦旭，刘琮琮，崔向美等。

本书所依托的课题顺利完成是各方面大力支持和帮助的结果。在课题立项和研究过程中，自始至终得到了长庆科技工程有限责任公司总经理何宗平教授级高工，副总经理刘伟高级工程师，长安大学地测学院院长彭建兵教授给予全方位的鼎力支持、指导和关怀，使项目在一个优越的环境下顺利完成。任兴文副总工程师，赵兴国高级工程师，相大为高级工程师，苏忠华主任，李静工程师，长安大学陈志新教授、门玉明教授、张俊教授等给予了技术指导和帮助，在此表示衷心的感谢；在课题鉴定时，中国勘察大师林在贯教授级高工、中国勘察大师刘厚建教授级高工、西安有色勘察院顾问总工关文章教授级高工、西安科技大学副校长杨更社教授、西北大学王家鼎教授、西安建筑科技大学岩土工程研究所所长刘增荣教授、西安煤炭设计研究院林杜军处长对我们的成果提出了重要的修改指导意见，长安大学刘建朝副校长，长安大学党委副书记杜向民教授，在百忙之中抽出时间参加成果鉴定会，林在贯大师和彭建兵教授还详细审阅了科研报告及本书的初稿，并提出了许多宝贵意见，使本书的最终成果增色不少，在此特向诸位一并表示衷心的感谢！

目 录

前 言

第 1 章 研究综述	(1)
1.1 毛乌素沙漠地质环境条件研究	(1)
1.2 毛乌素沙漠风积砂物理力学特性研究	(3)
1.2.1 毛乌素沙漠风积砂物理化学特性	(3)
1.2.2 砂土水特征曲线及渗透性研究	(3)
1.2.3 毛乌素沙漠风积砂力学特性的研究	(6)
1.3 砂土动力特性研究	(8)
1.3.1 动应力应变关系	(8)
1.3.2 动弹性模量与阻尼比随动应变变化特征	(9)
1.3.3 初始(最大)模量估算	(11)
1.3.4 饱和砂土液化破坏机理及影响因素	(12)
1.3.5 饱和砂土的抗液化强度	(14)
1.3.6 饱和砂土振动孔隙水压力发展特征	(14)
1.3.7 砂性土液化的确定性经验判别方法	(16)
1.4 地基承载力研究	(19)
1.5 桩体复合地基研究	(19)
1.6 主要内容及技术路线	(20)
第 2 章 毛乌素沙漠自然地理及地质环境条件	(23)
2.1 毛乌素沙漠自然地理条件	(23)
2.2 毛乌素沙漠大气运动及气候特征	(24)
2.3 毛乌素沙漠地区水文水资源特征	(25)
2.3.1 毛乌素沙漠地区地表水系统	(25)
2.3.2 地下水系统	(27)
2.4 毛乌素沙漠地区地质构造	(30)
2.5 毛乌素沙漠地区地层条件	(31)
2.6 毛乌素沙漠地貌类型及风沙地貌	(34)
2.6.1 毛乌素沙漠地貌类型及其分布	(34)
2.6.2 毛乌素沙漠风沙地貌	(36)
第 3 章 毛乌素沙漠风积砂基本物理力学特性试验研究	(42)
3.1 毛乌素沙漠风积砂物理化学特性	(42)

3.1.1	风积砂的天然密度、干密度、含水量及比重	(42)
3.1.2	风积砂颗粒组成分析	(42)
3.1.3	风积砂化学特性	(46)
3.1.4	风积砂微结构特征	(47)
3.2	毛乌素沙漠风积砂土水特征曲线试验与渗透试验研究	(49)
3.2.1	试验方案	(50)
3.2.2	试验结果及分析	(52)
3.2.3	小结	(55)
3.3	毛乌素沙漠风积砂力学特性	(55)
3.3.1	风积砂击实特性研究	(55)
3.3.2	风积砂压缩特性试验	(57)
3.3.3	风积砂直剪强度试验	(64)
3.4	小结	(72)
第4章	毛乌素沙漠风积砂应力路径力学试验与模型参数研究	(73)
4.1	土应力应变关系概述	(73)
4.2	应力路径试验研究	(75)
4.2.1	应力路径试验研究现状	(76)
4.2.2	应力路径试验方案及拉伸试验设备改装	(78)
4.2.3	应力路径试验分析	(81)
4.3	非线性弹性本构模型——D-C模型及参数分析	(92)
4.3.1	线弹性模型	(92)
4.3.2	非线性弹性模型	(93)
4.3.3	邓肯-张模型	(94)
4.4	剑桥模型及参数分析	(96)
4.4.1	塑性理论	(97)
4.4.2	剑桥模型理论	(100)
4.4.3	关于剑桥模型的几点讨论	(102)
4.4.4	剑桥模型参数确定与分析	(103)
4.5	小结	(104)
第5章	基于状态的风积砂弹塑性本构模型与三轴试验模拟	(106)
5.1	概述	(106)
5.2	基于状态相关的砂土剪胀本构模型	(107)
5.2.1	砂土的状态及其描述	(107)
5.2.2	砂土状态参量、状态指数和相对剪胀指数	(107)
5.2.3	砂土的状态相关剪胀理论	(108)
5.2.4	基于状态相关剪胀本构模型	(108)
5.3	基于状态剪胀本构模型参数研究分析	(109)
5.3.1	模型参数研究分析——弹性参数 G_0 和 ν	(109)
5.3.2	模型参数研究分析——临界状态参数	(121)

5.3.3	模型参数研究分析——剪胀参数	(122)
5.3.4	模型参数汇总	(125)
5.4	小结	(125)
第6章	毛乌素沙漠风积砂地基承载力特性研究	(127)
6.1	试验设计及试验过程	(127)
6.1.1	试验基坑设计	(127)
6.1.2	试验工况设计	(127)
6.1.3	静载荷试验过程	(131)
6.2	静载荷试验承载力结果与分析	(132)
6.2.1	$P-s$ 曲线特征及地基变形破坏特点	(132)
6.2.2	风积砂含水量对地基承载力的影响机理	(136)
6.2.3	初始干密度对地基承载力的影响	(137)
6.2.4	地基处理方法对承载力的影响	(139)
6.3	地基沉降变形特征及其机理分析	(141)
6.4	地基附加应力分布及其变化特征	(146)
6.4.1	地基附加应力计算方法	(146)
6.4.2	地基附加应力计算结果	(146)
6.4.3	地基附加应力分析	(151)
6.5	风积砂模拟地基静载荷试验数值模拟分析	(161)
6.5.1	模型建立及单元划分	(161)
6.5.2	边界条件定义及模型参数的选取	(161)
6.5.3	模型计算结果与分析	(162)
第7章	毛乌素沙漠风积砂地基动力特性研究	(167)
7.1	研究方案	(167)
7.2	试验结果及分析	(170)
7.2.1	动弹模阻尼比试验结果及分析	(170)
7.2.2	等效动黏弹性本构模型	(183)
7.2.3	残余应变试验结果及分析	(185)
7.2.4	动强度试验结果及分析	(186)
7.2.5	风积砂地基动强度及地震液化判别分析	(193)
7.3	小结	(193)
第8章	毛乌素沙漠风积砂地层桩体复合地基承载力试验研究	(194)
8.1	振冲砂桩试验场地条件	(194)
8.2	振冲砂桩法	(197)
8.2.1	振冲砂桩成桩工艺参数	(197)
8.2.2	振冲砂桩复合地基原位载荷试验	(199)
8.2.3	振冲砂桩复合地基承载力理论计算	(209)
8.3	水泥土搅拌桩复合地基试验研究	(211)
8.3.1	水泥土搅拌桩成桩工艺参数及主要施工步骤	(211)

8.3.2	水泥土搅拌桩复合地基原位载荷试验	(212)
8.3.3	水泥土搅拌桩复合地基有效桩长研究	(217)
8.3.4	水泥土搅拌桩复合地基承载力的确定	(221)
8.4	振冲碎石桩复合地基试验研究	(223)
8.4.1	振冲碎石桩试验场地条件	(223)
8.4.2	振冲碎石桩成桩工艺参数及试验设计	(224)
8.4.3	振冲碎石桩桩间距的确定及桩间土挤密效果对比	(224)
8.4.4	天然地基原位载荷试验	(226)
8.4.5	振冲碎石桩复合地基单桩载荷试验	(227)
8.4.6	振冲碎石桩复合地基单桩有效桩长的确定	(228)
8.4.7	振冲碎石桩复合地基桩间土载荷试验	(229)
8.4.8	振冲碎石桩复合地基载荷试验	(230)
8.4.9	振冲碎石桩单桩及复合地基承载力的确定	(231)
8.5	毛乌素沙漠风积砂地基载荷试验有限元数值模拟	(231)
8.5.1	砂桩复合地基载荷试验有限元数值模拟	(231)
8.5.2	水泥土搅拌桩复合地基载荷试验有限元数值模拟	(235)
8.5.3	碎石桩复合地基载荷试验有限元数值模拟	(237)
第9章	毛乌素沙漠风积砂工程适用性试验研究	(242)
9.1	以风积砂为细骨料的砂浆试验研究	(242)
9.1.1	试验用原材料	(242)
9.1.2	水泥用量对砂浆抗压强度的影响	(244)
9.1.3	砂浆拌和物和易性试验研究	(244)
9.1.4	砂浆强度试验研究	(249)
9.1.5	砂浆收缩试验研究	(252)
9.1.6	经济合理性分析	(255)
9.2	灰-砂-土垫层的最优配比重型击实试验	(257)
第10章	主要结论及展望	(259)
10.1	主要结论	(259)
10.2	展望	(260)
	主要参考文献	(262)

第1章 研究综述

1.1 毛乌素沙漠地质环境条件研究

关于沙漠地质环境条件方面的研究,最早起始于19世纪末有关风沙地貌学的研究。起初主要是国外旅行家或探险家对沙丘形态等进行简单定性的描述与分析,研究区域主要涉及撒哈拉沙漠、南亚次大陆、阿拉伯半岛、卡拉哈利沙漠和中亚地区沙漠等。其后Bagnold在1941年出版了经典著作“The Physics of Blown Sand and Desert Dunes”^[4],为风沙地貌学、风沙物理学理论体系的形成奠定了基础。此后,风沙地貌学研究日渐完善,研究方法、手段变得多样化,研究结果定量化,研究区域扩大化(几乎涵盖世界上所有沙漠地区)。研究内容包括:沙丘(沙漠)起源、沙区风沙情况及沙丘(沙漠)分类及演化等。对沙漠化的原因、风沙的物质来源、沙漠化的扩展、沙区环境演变与风况的关系及沙区输沙量与风况的关系等进行了研究。上述研究成果使得人们对风沙地貌的特征、成因、分布、演变等有了较为清晰的认识。

在新中国成立前的半个世纪内,对毛乌素沙漠的研究多集中于地质学和环境演变方面,但多为基于资料收集和初步分析的阶段,且主要是由一些国外学者利用野外考察所得的材料和印象对本地区的自然情况进行了初步报道,还未出现关于该地区的区域性研究论著。

新中国成立后对毛乌素沙漠的研究进入了一个新阶段,20世纪50年代开展的大规模地质勘探与考察对该地区的地质学研究不断深入。1962年,北京大学地理系与中国科学院治沙队共同组成了毛乌素沙区综合考察队,对毛乌素沙地进行了综合考察,内容涉及风沙来源与荒漠化问题、气候、水文、植被、土壤、土地分类与评价、农林牧生产等各个方面,主要对毛乌素沙地进行了较为宏观层面上的研究。

80年代毛乌素沙地的荒漠化问题逐渐成为人们关注的焦点。研究着重于植被生态学,其次为环境演变与历史地理、草地建设与畜牧业发展,荒漠化等问题再次之。国内学者对毛乌素区域地理、地质构造及沙漠的形成、分布、运移及其发展规律方面有所研究。北京大学地理系与中国科学院治沙队在以前研究的基础上出版了《毛乌素沙区自然条件及其改良利用》,该书对该区土壤的形成、分布及分类进行了简要的阐述,并对沙区土壤的机械组成和化学成分进行了一些初步研究。朱震达^[5,6]、朱震达等^[7,8]指出现今的毛乌素沙漠是历史时期形成的,其沙漠化过程大约延续在唐代后的千余年,并由西北向东南逐渐推进。

90年代的研究主要围绕环境演变和历史地理方面的问题,着重于毛乌素沙漠的形成、演变与成因问题以及一些时期的古环境重建,与80年代以前相比,这个时期的研究在研究尺度上开始向微观与宏观两个方面发展。董光荣等^[9~14]对鄂尔多斯第四纪特别是晚更新世以来的环境演变进行了研究,认为影响毛乌素沙地形成、演变的因素首先是冰期气候

波动,其次才是新构造运动和人类不合理的经济活动。中国林业科学院等单位组织实施了“毛乌素沙区立地分类评价与适地适树研究”项目,对毛乌素沙地的乔灌木立地类型进行了研究^[15],中国科学院植物研究所在毛乌素沙漠地区设立了鄂尔多斯草地沙地生态站,使得研究手段从以前的以地面调查为主走向定位研究;内蒙古草场资源遥感应用考察队伊克昭盟(现为鄂尔多斯)分队采用遥感技术与野外调查相结合的方法对鄂尔多斯高原的自然资源和环境进行了相关研究^[16],以期研究监测沙漠化动态。史培军于1991年出版了专著《地理环境演变研究的理论与实践——鄂尔多斯地区晚第四纪以来地理环境演变研究》^[17],对该地区的环境演变问题进行了进一步探讨。李保生等人^[18]在萨拉乌苏河流域研究了新近命名的“米浪沟湾地层剖面”,该剖面记录了距今150ka以来毛乌素地区27个旋回的沙漠与河湖相和古土壤沉积发育的交替演变的历史。指出这种沉积模式是由过去亚洲冬季风与夏季风相互对峙、互为消长的作用而产生的结果。吴波等^[19]分析了50年代以来毛乌素地区荒漠化发展及其时空特征,指出荒漠化迅速扩展主要是由于不合理的人类活动造成的,气候波动也有一定的影响。对于毛乌素沙漠成因问题的研究,虽然在初始沙漠化的发生时间及沙漠形成原因两个方面尚存在争论,但有关理论已趋于成熟,研究深度也较为深入全面,在不同成因观点的争论过程中对毛乌素沙漠地质环境条件的研究也逐渐趋于全面深入。

进入21世纪,随着各类工程向沙漠地区的发展,工程实践中开始遇到越来越多的与沙漠这一独特的地理单元有关的岩土工程问题和工程地质问题,有些问题变得日益突出,成为严重阻滞该区各类工程建设的瓶颈。在这些工程建设中,以公路工程建设居多,如新疆交通科学研究院等单位^[20]和一些学者如彭世古^[21]、任仓钰^[22,23]、刘文白等^[24,25],他们大多围绕甘肃、陕西、新疆等地沙漠地区特殊地质地段的公路建设技术开展了一些研究工作,多集中于公路设计、施工、养护技术和公路环境影响评价、路面材料与耐久性、沙害防治等问题的研究,获得了沙漠地区一些基础的工程力学指标和经验。出发点基本都是基于解决某一实际工程实践中所遇到的问题所做的一些基于点上的研究。目前有关砂土颗粒级配及矿物成分分析的一些试验一般只是为了满足单一工程的需要^[26~28],而胶结状态、微结构分析等方面则几乎是空白。

对于毛乌素沙漠的层序地层学方面的研究资料还较为缺乏,仅有的极少数成果也只对较浅部地层的结构进行过一些研究^[29],其着眼点在于研究全新世的古气候特征;而对于该区工程实践涉及深度范围内的地层结构缺乏应有的认识,仅有的一些认识也仅仅局限在个别场地^[30],且其着眼点仅在于研究剖面土壤水分动态。侯光才等^[31]出版的《鄂尔多斯盆地地下水勘查研究》对鄂尔多斯盆地地下水的赋存条件、循环机理和地下水资源特征等方面进行了系统研究,其中涉及毛乌素沙漠地下水资源环境部分的研究是目前该方面较为系统深入的研究成果,对毛乌素沙漠的含水层结构也有着较为深入的认识。

综观国内外的研究历史及现状可以看出,研究成果多集中于古人类和考古文化、植物学、农牧业生产、生态学及地质学等领域,使我们对毛乌素沙漠的成因、水文水资源及土壤资源等,气候、沙漠和沙漠化问题有了一定认识,对毛乌素沙漠的区域自然地理概况有了初步的了解,同时也在一定程度上从一些角度揭示了毛乌素沙漠地区的地质环境条件,这些研究成果虽然尚缺乏系统性,但还是为以后的研究工作奠定了一定的基础。

1.2 毛乌素沙漠风积砂物理力学特性研究

1.2.1 毛乌素沙漠风积砂物理化学特性

如前所述,目前关于毛乌素沙漠风积砂物理化学特性的研究,多是基于解决某一实际工程实践中所遇到的问题所做的一些点上的工作,并由此而获得了沙漠地区一些零散的物理化学指标。有关砂土颗粒级配及矿物成分分析的一些试验一般只是为了满足单一工程的需要,而胶结状态、微结构分析等方面则几乎是研究领域的空白。

1.2.2 砂土水特征曲线及渗透性研究

岩土工程所涉及的土大部分为非饱和土,由于非饱和土的性状并不符合经典饱和土力学的原理和概念,因此无论在理论研究或工程实践中都应该将二者区别对待。基质吸力是非饱和土区别于饱和土的根本所在^[32],因而研究非饱和土的工程特性应先从非饱和土的吸力特性着手。目前,由于吸力测量技术方面存在不少的问题^[33,34],因此对于非饱和砂土方面的土水特征曲线研究较为少见,完整的脱湿和吸湿土水特征曲线更是少见。而对于目前关于毛乌素沙漠风积砂土水特征曲线与渗透试验方面的研究尚属于空白。

非饱和土中的(总)吸力可以分为基质吸力和渗透吸力。当非饱和土中矿物对吸力影响不大时,渗透吸力可以忽略,土中的基质吸力就是总吸力,所以,从与工程问题的关系上来说,只要重点研究基质吸力即可。在涉及非饱和土的大多数岩土工程问题中,可用基质吸力变化代替总吸力变化;反之,也可用总吸力变化代替基质吸力变化。基质吸力的变化范围很大($0\sim 10^6$ kPa)^[35],而要用可靠的手段较准确地测量大范围的吸力值目前仍很困难^[36]。目前吸力量测可分为直接测量技术和间接测量技术^[35~37],其中吸力直接测量技术主要包括湿度计、张力计法和轴平移法,吸力间接测量技术主要包括热传导传感器法、时域反射计法、电容式吸力计仪法、粒基传感器法及滤纸法等。

1.2.2.1 吸力直接量测技术

(1) 湿度计

热电偶湿度计可用于测量土的总吸力^[38]。岩土工程中常用的湿度计为 Peltier 湿度计。它的工作原理是 Seeback 效应和 Peltier 效应,并通过湿度、温差、电压输出三者之间的联系,由电压输出值反映空气湿度。测量前,应先对湿度计进行率定,作出电压与吸力曲线。测量时,将湿度计悬挂在装有土样的封闭装置内,记录下电压输出的最大值,从率定曲线上查出对应的总吸力值。测量时注意必须待密闭室内土、空气和湿度计达到等温平衡后才能进行率定或测量,环境温度必须严格控制在 0.001°C 左右。湿度计测吸力未引入多孔介质,不会受多孔材料储水特性的影响,从而可在较短时间内较准确地测量高值吸力。它的缺点是率定、测量的设备都较复杂,对环境要求高,无法用于现场测量;也无法

测量低于 100kPa 的吸力值，同时热电偶在酸性环境中易腐蚀，每次率定或使用后，一定要按厂家说明彻底清洗。用不干净或不合格的湿度计测出的结果很难分析。

(2) 张力计法

张力计法是由高进气值陶瓷头与压力量测装置组成^[39]。二者用一小管相连。小管通常用塑料做成，它的导热性低而且不腐蚀。管和陶瓷头用除去空气的水充满。将陶瓷头插入预先挖好的孔中直到与土良好接触。当土和量测系统之间达到平衡时，张力计中的水将与孔隙水具有相同的负压。但是由于张力计中的水可能出现气蚀现象，使得张力计能够测定的孔隙水压力限度约为 90kPa。所以张力计法量测范围小而且存在气蚀和通过陶土头空气扩散问题。

该方法的优势在于不受外界环境限制，而且体型小、易携带，室内、野外量测都适用。正、负孔隙水压力都能测，且反应较迅速。直接测量，无须事先率定。不但人工测读方便，还可利用数据采集系统自动读数，便于野外无人测量。但该方法也有以下局限性：

- 1) 张力计的陶瓷头必须与土接触良好，以确保土中水与张力计管中水连续，但这一点（尤其是在野外时）不易确定。
- 2) 陶瓷头较脆弱，易开裂，一旦开裂便不能再用（下面的一种方法也存在这一问题）。
- 3) 测量范围会受“气蚀”现象的限制：当孔隙水压力接近负一个大气压时，水会气化，使测量系统中进气而无法正确读数。可见，用张力计测量到的负孔隙水压力的绝对值不会超过一个标准大气压。
- 4) 测量范围还会受陶瓷头的进气值的限制：要保证陶瓷头的进气值必须大于待测的基质吸力，否则空气将穿过陶瓷板进入测量系统（轴平移法也存在这一问题）。

(3) 轴平移法

轴平移法是同时增加围压、孔隙气压力和孔隙水压力，使试样中的应力状态变量保持不变而解决孔隙水压力测量的气蚀问题，其方法是使用高进气值陶瓷板，只要空气压力小于陶瓷板的进气值，它将阻止空气通过，而水则能够通过陶瓷板渗透，从而可以通过分别控制孔隙气压力及孔隙水压力达到控制吸力的目的^[40]。可见只有当陶瓷板中的水是连续的，才可能正确测出吸力。在基质吸力测量过程中保持没有水的流动。

测量方法是将被饱和土土样放入压力室，饱和的高进气值陶瓷针头一端插入土中，另一端由充满蒸馏水的连接管连到压力室外的零型压力测量系统上。针头一插入非饱和土，测量系统中的水便进入张拉状态，应迅速封闭压力室，增加压力室内的气压，遏制量测系统中的水受到进一步张拉，直到作为零指示器的水银塞保持不动，达到平衡。此时室内的空气压力与测得的孔隙水压力的差值即土的基质吸力。

该方法的不足主要有以下两个方面：

- 1) 采用轴平移技术进行长期试验时，很难保证水压力测量系统中始终没有气泡：由于土样和高进气值陶瓷板的透水系数都较低，平衡时间往往会较长。在此期间孔隙空气可能会通过高进气值陶瓷板中的水而扩散，并以气泡状态出现在陶瓷板下，使所测的基质吸力偏低。
- 2) 陶瓷板的进气值与板的最大孔径成反比，而渗透系数却随板孔径的变大而变大。陶瓷板的进气值和渗透系数之间有此强彼弱的矛盾。

1.2.2.2 吸力间接测量技术

间接测量原理：将多孔材料作为传感器放置土中，达到平衡后多孔材料中的基质吸力等于周围土中的基质吸力。由于多孔材料中的含水量是多孔材料中基质吸力的单值函数，可通过测量多孔材料的平衡含水量获得土中的基质吸力。

(1) 热传导传感器

热传导传感器主要由微型加热器和多孔陶瓷头组成。微型加热器（和温敏元件）安装在陶瓷头中心处，加热时发出的热量一部分由热扩散扩散到陶瓷头中，未扩散部分则使探头中部温度上升，上升温度由温敏元件通过电压输出反映。陶瓷头中含水量越高，热扩散就越多，陶瓷头中部的温度升高就越小。测量前先要作出传感器的率定曲线，即电压输出一吸力曲线。

作为热传导传感器探头材料的陶瓷，其孔径大小及分布应符合一定的要求，以保证有较大的吸力测量范围；陶瓷的机械强度应较高，以免制作及使用过程中损坏；为防止裂缝产生，陶瓷强度应较均匀，同时陶瓷探头内的电子元件必须密封好，否则会碰到水而导致测量失败。另外，探头中心的加热量（包括加热功率及时间）必须足够大，以使探头周围温度变化的影响基本可以忽略；同时为避免热扩散超出探头而使周围土体发生变化，加热量又必须足够小（且探头半径足够大），以使热扩散在到达探头边缘时已近似为零^[41]。可见，加热量一定要选择合适。

(2) 时域反射计

时域反射计（TDR）是由陶瓷传感器与短探杆组合做成的，用压力板仪率定。它采用驻波技术测土的介电参数，介电参数又与体积含水量紧密关联，因此可测含水量。测量过程如下：给探测器加上电压脉冲，传至探杆端部再返回，记下时间差 t 。首先用公式 $k_a = (ct/2l)^2$ （其中， k_a 为介电常数； c 为光速； l 为杆长）计算出 k_a ，然后运用 Topp 方程（1980）： $\theta = -0.053 + 0.0292k_a - 5.5 \times 10^{-4}k_a^2 + 4.3 \times 10^{-6}k_a^3$ ，得到体积含水量 θ ，最后由探头的率定曲线推测出基质吸力^[42]。其中介电常数 k_a 除了主要随土体的含水量变化外，还受土体比重、温度、含盐量、矿物成分等参数的影响，其中以土的粒径大小和容重对率定曲线 $k_a - \theta$ 影响最大。

(3) 电容式吸力仪

电容式吸力仪的工作原理是：在陶瓷探头与周围土湿度平衡后，利用陶瓷头的土水特征曲线，根据陶瓷头的含水量就可以查得土的基质吸力。因为纯水与多孔陶瓷的介电常数相差甚大，探头的介电常数可直接反映含水量大小，所以可用电容标定含水量，电容再转换为电压信号输出，最后通过压力板仪率定吸力仪的基质吸力-电压输出关系曲线。现场测量时，只需测出探头的输出电压就可确定土的基质吸力。该仪器适合测量 200kPa 以下吸力，可连续读数，灵敏度高且陶瓷头细微破损对读数影响不大，但需考虑溶于孔隙水中的电解质对传感器输出值的影响^[43]。

(4) 粒基传感器（granular matrix sensor）

多孔块（porous block）测基质吸力的原理是含水量（吸力）和电阻的对应关系^[44]。在多孔块中植入两个同心电极，测电阻即可求得吸力。多孔块一般用石膏制成，具有价格低和易操作的优点，但石膏吸水饱和后会软化。粒基传感器用粉粒基质代替石膏，这就避

免了软化的问题，且孔隙分布均匀。

(5) 滤纸法

滤纸法是建立在滤纸能够同具有一定吸力的土达到平衡（水分流动意义上）的假设基础上的^[45]，通过土与滤纸之间的水分或水蒸气交换可以达到平衡。当滤纸与土样直接接触时，滤纸的平衡含水率相当于土的基质吸力；当滤纸与土样不直接接触时，滤纸的平衡含水率相当于土的总吸力。所以同一率定曲线可用于测定基质吸力和总吸力。

滤纸法是最便宜的传感器，同时它对环境温度要求不高，只要保持整个平衡过程中温度大致不变（温度变化约在 1℃ 以内）即可。但滤纸法存在如下缺点：

1) 操作过程对人工技术要求较高，结果受操作人员以及实验室条件的影响很大，准确程度难以保证。

2) 平衡时间较长：若初始为干滤纸，平衡时间一般需 7~10d；若初始为湿滤纸，则一般需 21~25d。

3) 滤纸材料的储水特性对高吸力范围可能会有影响。

总之，吸力是非饱和土力学的关键变量，理论上，它和非饱和土的渗流、强度和变形有关，实践中，应用的也越来越多，同时，吸力测量的技术也在不断发展，给未来更精确测量吸力提供了可能。随着计算机的发展和普及，一方面，土吸力的测量也在向智能化方向发展，另一方面，试验装置向适于野外原型观测发展。

1.2.3 毛乌素沙漠风积砂力学特性的研究

由于土是岩石风化而成的碎散矿物颗粒的集合体，土一般含有固、液、气三相，在其形成的漫长的地质过程中，受风化、搬运、沉积、固结和地壳运动的影响，其应力应变关系十分复杂，并且与诸多因素有关。一方面，土的应力应变特性具有非线性、弹塑性和剪胀（缩）性等特点；一方面，土的应力应变特性受 3S 影响较大，即：应力水平（stress level）、应力路径（stress path）和应力历史（stress history）^[46]。

(1) 应力水平

所谓应力水平一般有两层含义：一是指围压的绝对值的大小；二是指应力（常为剪应力）与破坏值之比，即 $S=q/q_f$ ，这里应力水平是指围压。

中密砂在不同围压下的三轴试验曲线中随着 σ_3 增加，砂土的强度和刚度都明显提高，应力应变关系曲线形状也有变化。在很高围压下，即使很密实的土，也与松砂的应力应变关系曲线相似；没有剪胀性和应变软化现象。

应当指出，土的抗剪强度 τ_f 或 q_f 随着正应力 σ_n 或围压 σ_3 增加，但破坏时的应力比或者砂土的内摩擦角 φ 则常常随着围压的增加而降低。

土的变形模量随着围压而提高的现象，也称为土的压硬性。由于土是由碎散的颗粒所组成的所以围压所提供的约束对于其强度和刚度是至关重要的。这也是土区别于其他材料的重要特性之一。简布（Janbu）在 1963 年用下式表示土在三轴试验中初始模量 E_i 与围压 σ_3 之间的关系：

$$E_i = K P_a \left(\frac{\sigma_3}{P_a} \right)^n \quad (1.1)$$

式中： K 、 n 为试验常数； P_a 为大气压，与 σ_3 量纲相同。这个公式后来为许多本构模型所应用。

(2) 应力路径

中密砂的真三轴试验中 σ_3 保持不变，中主应力不同（每个试验的 b 为常数）的试验表明，随着中主应力的增加，曲线初始模量提高，强度也有所提高，体胀减少，应变软化加剧（图 1.1）。

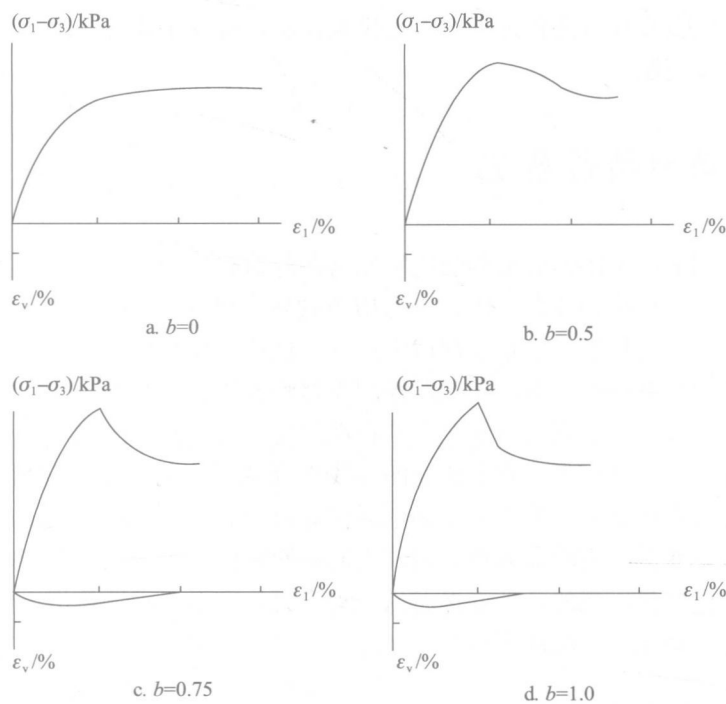


图 1.1 不同中主应力时偏差应力 $(\sigma_1 - \sigma_3)$ 与轴应变和体应变 ϵ_v 的关系曲线

(3) 应力历史

应力历史既包括天然土在过去地质年代中受到的固结和地壳运动作用，也包括土在试验室（或在工程施工、运行中）受到的应力过程。对于粘性土一般指其固结历史。如果粘性土在其历史上受到过的最大先期固结压力（指有效应力）大于目前受到的固结压力，那么这就是超固结粘土。如果目前的固结压力就是其历史上最大固结压力，那么它就是正常固结土。如上所述，土的流变性使粘性土在长期荷载作用下，尽管历史上固结应力没变化，但由于次固结使土表现出超固结的性状。这也是一种应力历史的影响。

针对砂土的应力应变关系曲线具有应力路径相关性，在相同的起始和结束应力状态下，所经历的应力路径不同，砂土的应力应变关系明显不同。在实际工程中，不同施工阶段不同部位的土体经历的应力路径是不同的，从而导致土体的应力应变关系及强度的复杂性。目前土工数值计算中常用的土体本构模型大多建立在常规三轴试验的基础上，其模型参数也是基于简单的试验。但是，常规三轴试验仅能反映土体在三轴压缩条件下的强度与变形特性，对于其他的应力路径则无能为力。另外，在很多土体本构模型中，都采用