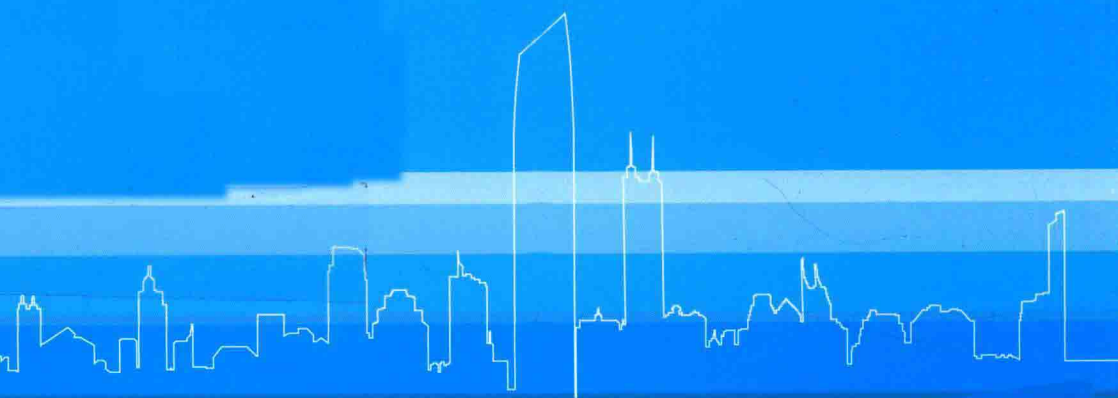


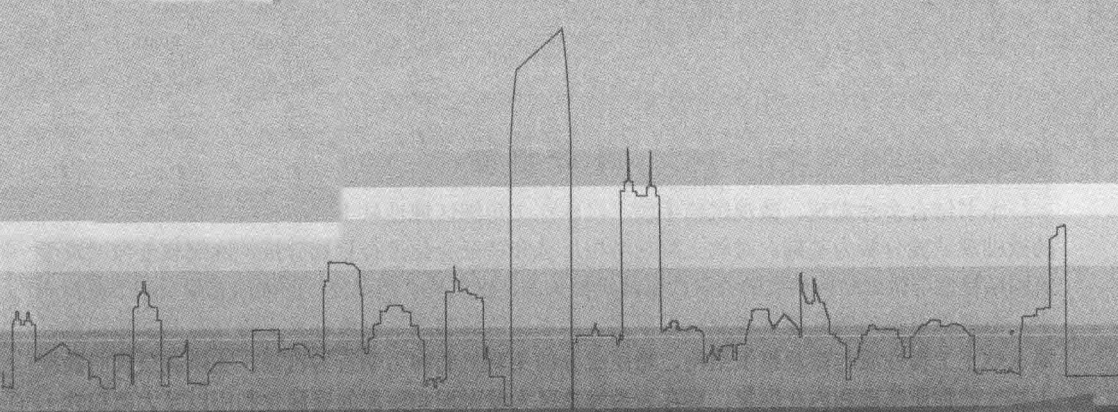


珠江三角洲区域

软土强度与渗流固结特性的 微细观试验与机理研究

周晖◎著

 **北京理工大学出版社**
BEIJING INSTITUTE OF TECHNOLOGY PRESS



珠江三角洲区域

软土强度与渗流固结特性的 微细观试验与机理研究

周晖◎著

 **北京理工大学出版社**
BEIJING INSTITUTE OF TECHNOLOGY PRESS

内 容 提 要

本书结合多种宏观、微观试验手段,以珠江三角洲区域性软土强度、渗透固结、渗流特性的微细观试验分析为基础,对软土微观结构形态和特征变化进行量化分析,确定软土强度及渗流固结特性与微观结构参数的关联性以及定量关系,建立基于微观分析的固结方程及基于颗粒—水—电解质系统的圆孔微观渗流物理模型。本书由微观物理机制解释软土特性及其变化规律,揭示软土工程性质与微观组织结构、物质成分的关联机制和力学行为机制,在微观层次明确软土特性的物质基础和内在因素,旨在为沿海地区大量淤泥和污泥的资源化利用以及大面积软土地基加固处理提供新的技术方法和工艺。

版权专有 侵权必究

图书在版编目(CIP)数据

珠江三角洲区域软土强度与渗流固结特性的微细观试验与机理研究 / 周晖著. — 北京: 北京理工大学出版社, 2017. 5

ISBN 978-7-5682-4053-6

I. ①珠… II. ①周… III. ①珠江三角洲—软土—渗流—研究 IV. ①P642. 13

中国版本图书馆CIP数据核字(2017)第109609号

出版发行/北京理工大学出版社有限责任公司

社 址/北京市海淀区中关村南大街5号

邮 编/100081

电 话/(010) 68914775 (总编室)

(010) 82562903 (教材售后服务热线)

(010) 68948351 (其他图书服务热线)

网 址/<http://www.bitpress.com.cn>

经 销/全国各地新华书店

印 刷/北京紫瑞利印刷有限公司

开 本/710毫米×1000毫米 1/16

印 张/14.5

字 数/292千字

版 次/2017年5月第1版 2017年5月第1次印刷

定 价/78.00元



责任编辑/李玉昌

文案编辑/瞿义勇

责任校对/周瑞红

责任印制/边心超

图书出现印装质量问题,请拨打售后服务热线,本社负责调换

前言 Preface

近年来,我国沿海地区经济实力飞速提升,发展规模不断扩大,已出现建设用地紧缺的问题,有限的土地资源难以满足居住、绿化、交通、工业和商业等建设需要,而解决的有效途径就是向海要地,即围海造陆。目前,广州南沙港区、天津港临港工业区、厦门港海沧港区以及苏州港、深圳港、宁波港和连云港等都实现了围海吹填造陆。其基本思路是利用水里吹填工艺把海底淤泥质土吹上来形成陆域,然后再对填海造陆工程大面积超软弱淤泥进行排水固结处理。这类吹填而形成的软土地基具有含水量高、渗透系数小、压缩性大、强度及承载力低等特点。

珠江三角洲地区大面积的围海造陆工程需要消耗大量的岩土填料,而解决岩土材料紧缺问题的有效途径就是让软土替代岩土填料,既可以就地取材又有利于环境保护。上述软土地区有大量的软土地基需要加固处理,以满足工程建设发展的需要。而软基加固工程中出现的问题并非都能通过宏观研究解决,软土的宏观工程性状在很大程度上受到其微细观性质的影响和控制,从而导致工程特性的变化。但长期以来,人们主要从宏观层次对软土的工程特性进行研究,难以抓住决定软土性质的本质因素从而对其工程特性做出深入研究。

针对上述问题,本书从微观结构动态观测试验和微视力学机制分析入手,对于珠江三角洲软土区域特性及

其成因的微观机理进行研究,采用先进的计算机图像数字化处理技术,对软土微观结构形态和特征变化的实时观测图像进行量化分析,确定软土特性与微观结构参数的关联性以及定量关系,由微观物理机制解释软土特性及其变化规律以及区域特性成因的微观机理,揭示软土工程性质与微观组织结构、物质成分的关联机制和力学行为机制,在微观层次明确软土特性的物质基础和内在因素。针对大面积围海造陆工程新吹填淤泥土地基极端劣势的工程特性和物理力学性质,基于微观时效变形模型和微观渗流模型的初步研究成果,笔者提出了适用超软弱新吹填淤泥地基加固的方法和新工艺,并在广州南沙、厦门的吹填淤泥地基加固工程中成功应用,具备了应用技术创新的条件。本书有助于工程设计、施工人员从微细观角度对软基加固及处理有全新认识,有助于建筑工程技术科学研究人员从微细观角度对软土的宏观工程特性进行深入研究,能对广大软土地区的软基加固与处理提供有益借鉴。

由于笔者能力有限,本书存在的不足之处,敬请广大读者指正。

著 者

目 录 Contents

第1章 绪论	1
1.1 研究背景	1
1.2 土体强度、渗透固结和渗流特性的研究现状 ...	2
1.3 土体工程特性与微细观结构模型关联性研究 现状	8
1.4 软土强度与渗流固结特性微细观研究存在的 主要问题	14
1.5 主要研究思路、方法与内容	15
第2章 软土强度与渗流固结特性的宏观、微观 试验方法	18
2.1 土体的强度特性试验	18
2.2 土体的渗流固结试验	19
2.3 土体微细观参数测试原理及方法	20
2.4 试样制作及微细观参数测试	35
2.5 土体微结构定量分析的PCAS图像处理技术 ...	43
2.6 本章小结	49
第3章 珠江三角洲软土工程性质的成因与微观 因素分析	51
3.1 概述	51

3.2 珠江三角洲软土成因的地质与水文环境分析 ...	52
3.3 珠江三角洲软土的成分分析	57
3.4 珠江三角洲软土的颗粒特征分析	61
3.5 珠江三角洲软土的微观特征分析	62
3.6 珠江三角洲软土工程性质分析	67
3.7 本章小结	77

第4章 软土强度特性的微细观参数试验与分析 80

4.1 概述	80
4.2 矿物成分对强度特性影响试验	80
4.3 含水量对强度特性影响试验	85
4.4 孔隙液浓度对强度特性影响试验	88
4.5 土体强度特性的微细观分析	93
4.6 本章小结	105

第5章 软土固结特性的微细观参数试验与分析 106

5.1 概述	106
5.2 软土孔隙特征参数的试验研究	106
5.3 基于MIP试验的固结过程孔隙特征测试结果与分析	113

5.4	基于ESEM试验的固结过程孔隙特征测试结果与分析	123
5.5	两种显微试验固结过程的孔隙特征测试结果比较	133
5.6	本章小结	137
第6章	软土渗流特性的微细观参数试验与分析	138
6.1	概述	138
6.2	软土渗流试验与分析	139
6.3	软土渗流的微观机理分析	148
6.4	本章小结	157
第7章	软土渗流的微观模型分析	159
7.1	概述	159
7.2	软土渗流的微观圆孔模型	160
7.3	软土渗流微观模型计算	168
7.4	模型与实验结果的对比分析	173
7.5	本章小结	176
第8章	基于微观试验的软土固结特性分析	177
8.1	概述	177

8.2	软土压缩性和渗透性的微观参数分析	178
8.3	基于微观分析的软土固结变形计算分析	181
8.4	修正模型结果与太沙基模型结果及试验结果的 比较分析	192
8.5	本章小结	204
第9章 结论与展望		206
参考文献		209

第 1 章 绪 论

1.1 研究背景

软土是一种物理力学性质复杂的天然工程建设材料,是由固体颗粒、孔隙液、孔隙气和土颗粒间的胶凝物等组成的多相介质,具有天然含水量高、孔隙率大、压缩性高、流变性显著、强度低、渗透性差等“四高二低”的工程性质。我国软土地域分布广泛,在沿海、河流及湖泊附近均有较厚的第四纪松软层覆盖,如上海和广州等地的三角洲相沉积软土,天津、大连、宁波等地的滨海相沉积软土,福州闽江口地区的溺谷相沉积软土等。由软土工程性状研究可知,土的宏观物理力学性能实质上受其微细观性质的影响和控制,主要的微细观因素有:土的矿物和化学成分;土的结构特征,即土粒形态学、几何学和能量学特征^[1];土粒的表面物理化学性质,如比表面积、阳离子交换量和表面电位等;孔隙水的物理化学性质,包括结合水状态、黏滞性和离子浓度等。

目前,土体宏观领域的研究已相对成熟、完善,而土体微细观领域的研究仍处于发展阶段。其中,宏观领域研究是将土体看作一种均匀连续体,采用连续介质力学和不可逆热力学的理论,探讨土体强度、固结和渗透等工程特性的客观规律与内在联系;细观领域则主要结合宏观范畴以确定土的主要物理力学特性;微观领域则从内在机理上分析土体强度、固结和渗透等特性,研究微细观因素对其宏观物理力学性能的作用原理和影响方式。微细观领域的研究需要借助先进的仪器和测试技术,诸如 X 射线衍射仪、环境扫描电子显微镜、压汞仪、比表面积测试仪等,研究土体的矿物组成及比例、颗粒(孔隙)尺度及分布、比表面积和表面电荷量、结合水含量和状态等参量与其强度、固结和渗透性的内在必然联系和定量关系。

20 世纪 20 年代,现代土力学的奠基人——太沙基提出:评价黏性土的变形与强度特性时应当注意其微观结构的重要性,此后,Попов、Lamb、Van Ophen、Push 和 Bowles 等人均开展了土体微观结构的研究,并提出了许多新的概念和微观结构模型^[2]。1973 年召开的首届国际土结构会议,就土体微结构观测和分析方法、

土体微观性质与其变形和破坏机理的联系进行探讨,标志土体微结构研究进入了一个新阶段。20世纪80至90年代,Bazánt等人^[3](1984)和Carol^[4](1990)相继建立了黏性土的变形、蠕变方面的微观力学模型。相对而言,我国的土体微细观研究起步较晚,学者谭罗荣^[5](1983)、李生林^[6](1985)、施斌^[7](1988)、高国瑞^[8](1990)等人对海相沉积黏土、膨胀土、黄土等特殊土体的微细观结构特征与工程特性进行了较为详细的研究,并取得了许多研究成果。进入21世纪后,张敏江^[9](2005)、房后国^[10](2007)、梁健伟^[11](2010)等人利用各种先进的图像观测和处理技术,结合三轴压缩、流变固结等宏观力学实验开展土体的微观定量分析和微结构参数研究,初步揭示了软土宏观强度和变形的微结构控制机理。

许多工程实践表明,并非所有的工程问题都能通过宏观研究解决:对美国、澳大利亚及我国滨海地区的盐渍土地基建设项目,如采用普通软土地基的加固方法,收效甚微^[12~14];对广州等地的极细颗粒海相淤泥土地基进行加固时也发现,吹填淤泥土的固结度、加固效果等技术指标与基于太沙基渗流固结理论的设计结果存在明显差距^[15,16]。常规地基处理方法针对特殊软土地基失效的主要原因,可归结于极细土颗粒自身的比表面积大、带电现象明显、吸附的结合水膜厚,颗粒—水—电解质系统的相互作用对其工程特性产生显著影响^[17]。土体的宏观物理力学特性受各种微细观因素共同影响,微细观特征变化是导致宏观特征变化的主因,也是宏观工程特性变化的根源所在。因此,需要进一步结合土体的宏观物理力学试验及微细观参数测试,从微细观的角度对软土的宏观工程特性开展研究,探讨影响软土强度、固结和渗透特性等物理力学行为的物质基础、物理机制、控制因素以及与其各种微观参数的定量关系。

在开展研究之前,首先对软土的强度、固结与渗流特性的宏观、微细观领域的研究现状及土体微细观结构模型与工程特性的关联性研究成果进行回顾,并针对实际工程与试验研究中存在的问题,提出主要研究思路和研究内容。

1.2 土体强度、渗透固结和渗流特性的研究现状

1.2.1 土体强度特性的研究现状

1.2.1.1 宏观领域研究现状

1776年,法国科学家库伦最早提出了土的抗剪强度宏观理论,他针对砂土剪切试验提出了砂土的抗剪强度公式,而后考虑黏聚力的作用又提出了黏性土的抗剪强度公式。1910年,德国科学家莫尔提出抗剪强度包线在较大应力范围内往往

呈曲线形状的观点。莫尔—库伦(Mohr—Coulomb)强度理论描述了平面应变条件下土体单元任一截面上的法向应力和剪应力,可通过莫尔圆与抗剪强度包线是否相切的几何关系判断土体是否达到极限平衡状态。然而,土体是由固相、液相和气相组成的三相体,在固结压力作用下,土体所承受的法向应力由土颗粒与水共同承担,而剪应力只能由土骨架承担,1936年,太沙基由此提出了饱和土的有效应力原理,认为土的抗剪强度可以表示为剪切面上有效法向应力的函数。另外,对非饱和土的强度性状的研究方面,学者们普遍认为孔隙水对强度的影响非常复杂,其黏聚力与土的内在膨胀力或吸力有关,其数值通过试验不易测定,A. W. Bishop^[18](1960)、D. G. Fredlund^[19](1978)、缪林昌^[20](1999)、陈敬虞^[21](2003)等人分别提出了非饱和土的破坏准则和强度公式。基于各种强度理论,多种测试仪器和方法被用于测定土的各种强度参数,得到了一系列的室内及原位测试的强度试验成果。张银屏等人^[22](2004)通过直剪试验和三轴试验研究了土体固结度与抗剪强度的关系,结果表明:抗剪强度随固结度的增加而增加,但强度指标并非单调增加。陈晓平等^[23](2008)采用剪切、固结等室内试验,从强度和变形两方面研究了广州等地区软土的结构性,分析出了影响结构性软土力学特性的因素。郑刚等人^[24](2009)采用自制三轴仪研究天津市粉质黏土原状饱和样的排水卸荷条件对其强度特性的影响,结果表明几种应力路径下土体的有效应力强度指标基本相等。吴玉辉等人^[25](2011)基于摩尔—库伦抗剪强度公式,结合十字板强度与深度的关系,建立土体抗剪强度指标的统计回归方程,并由此推算出地基土的抗剪强度指标。许成顺等人^[26](2016)针对福建标准砂及细砂进行了不同反压下单调排水与不排水剪切试验,分析不同反压下砂土的应力—应变关系。试验结果表明:反压对剪胀性砂土的固结不排水剪切强度具有显著影响,对剪缩性砂土的不排水抗剪强度影响不显著。反压对砂土固结排水抗剪强度的影响较小,对其有效抗剪强度指标基本无影响。

1.2.1.2 微细观领域研究现状

软土强度特性的微细观领域研究主要集中在探索颗粒尺度和比分、孔隙尺度和比分、微结构特征等微细观参数与宏观强度特性的关系方面,目前常用的研究方法是对软土样品进行微观结构检测和理论分析,测试手段主要包括X射线衍射、热分析技术、红外光谱、偏光显微镜、扫描电子显微镜、透射电子显微镜和压汞测试等。

Skempton^[27](1964)基于对黏土边坡的稳定性分析,发现剪切作用将导致滑动带上扁平状黏土颗粒产生微观结构的定向排列。Bai等人^[28](1997)研究了不排水抗剪过程中高岭土的微结构变化。严春杰等人^[29](2001)通过X射线衍射仪和扫描电镜研究了黄河小浪底等数十个滑坡事发地段土样的物质成分和微结构特征,将其与滑坡的活动频次、活动阶段和形成机理相联系。Wen和Aydin^[30](2003)利用反向散射电镜和光学显微镜研究了某自然滑坡滑带土样的微观结构,提出黏土颗粒

含量、颗粒排列特征及孔隙度 3 个指标是引起滑带土力学性质变化的主要内因。吕海波等人^[31](2005)利用压汞试验结果确定了结构性损伤模型参数并采用室内三轴试验结果验证模型正确性,认为微观结构变化是结构强度丧失的主要原因。周翠英等人^[32](2005)对软土进行强度试验后,利用电镜扫描和图像处理方法提取剪切破裂面上的土样的微观结构特征参数,建立了微观参数与强度参数的关系。欧阳惠敏等人^[33](2008)研究了天津滨海新区软土固化后的无侧限抗压强度和微结构特征,分析其固化机理并对土的宏观力学性质与微观结构特征之间的关系进行了探讨。胡欣雨等人^[34](2009)采用真三轴仪和扫描电镜,从宏观、微观两个方面研究了黏土层中水泥盾构开挖面的稳定机理,分析在不同应力水平时泥浆作用对泥水盾构开挖面土体强度和变形特性的影响,并通过颗粒流数值模拟对试验结果予以验证。房营光等人^[35,36](2013, 2014)考虑土体微细观结构特征对其宏观强度特性的影响,采用三轴抗剪试验和胞元土体模型分析土体强度和变形的尺度效应特性。根据土体中小同尺度颗粒间的相互作用产生的聚集和摩擦效应,提出了“基体—增强颗粒”土体胞元模型,胞元体由基体和增强颗粒组成,其中基体由微小土颗粒集成,而增强颗粒为砂粒,宏观土体则简化为由许多胞元体构成的介质,引入了广义球应变和广义等效应变,基于应变能导出了考虑颗粒尺度效应的应力—应变关系以及屈服应力计算公式。同时,针对增强颗粒不同粒径和体分比的土样进行三轴不排水抗剪试验,给出了应力—应变和屈服应力尺度效应的测试结果,其研究成果对土体强度理论发展有重要的参考价值。

随着微细观理论和测试技术的快速发展,软土的诸多微细观参数不仅从定性角度,更从定量角度成为软土强度性状和变化规律的重要评价指标,在解释膨胀土的胀缩性、黄土的湿陷性和软土的低强度等特殊土的工程性质机理方面发挥了重要作用,并为改善特殊土的工程性质,建立更为符合工程实际的土体本构关系提供了试验基础和理论依据。

1.2.2 土体渗透固结特性的研究现状

1.2.2.1 宏观领域研究现状

渗透固结主要是指在外加荷载作用下,饱和或部分饱和土体中的水从孔隙中逐渐被排出,土体不断被压缩,孔隙水压力与有效应力不断转化,外加压力逐渐从孔隙水传递到骨架上,直至变形达到稳定为止的过程。对于高压缩性的饱和软土,其固结速率既取决于渗透固结速率又取决于土骨架的蠕变速率。渗透固结特性的研究在理论层面和实际工程应用中都具有极为重要的意义。目前,在大面积的软基处理中,一般利用砂井或塑料排水板堆载预压方法,排出土体孔隙中的水以提高其强度,即通过渗透固结来达到软基加固的目的。在整个加固过程中,土层固结系数的大小或固结速度的快慢对加固效果有着重要的影响。

1925年,太沙基提出了有效应力原理并建立了一维固结理论^[37],这是现代土力学发展过程史上一个重要里程碑。基于固结理论就可以对建筑物和构筑物进行沉降计算和预测,因此,对固结理论的研究也成为土力学中最基本的课题。Rendulic^[38](1936)将太沙基一维固结理论推广到了二维和三维情况,假定土体只发生竖向的变形,不考虑土骨架变形与孔隙水运动的相互影响,考虑了二维或三维渗流,这一理论在实际工程中被广泛应用;Biot^[39](1956)从严格的固结理论出发,提出了Biot固结理论并求出条形荷载下半无限地基固结问题的解,进而把该理论推广到动力问题;Gibson等人^[40](1967)提出了一维有限非线性应变固结理论,并在研究厚层黏土固结时发现,如考虑土体非线性的土层固结速率比用太沙基理论推导的要快;Baligh^[41](1978)等基于太沙基理论对矩形波载情况做了具体的分析;吴世明等人^[42](1988)推导了任意荷载下的一维固结方程的通解并以积分的形式予以表达;谢康和等人^[43](1995)给出了变荷载下任意层地基一维固结问题完整的解析解并编制相应的计算程序,为多层地基一维固结问题提供了完整的严密解和计算程序;蔡袁强等人^[44](1998)根据太沙基固结方程和Laplace变换求解出循环荷载下弹性多层饱水地基的一维固结方程通解。但是,太沙基一维固结理论存在自身难以逾越的不足,如假设固结过程中,土体的压缩系数和渗透系数不变,固结度和压缩度等等。魏汝龙^[45](1993)认为由于太沙基一维固结理论没有考虑水平向孔隙水压力的消散,导致其沉降速率变小,而多数实际工程的地基是在二维或三维条件下发生固结和变形,其实际沉降速率比太沙基一维固结理论计算的沉降速率快许多,并通过软基现场沉降观测得以验证。由此采用半对数型和双曲线型压缩曲线,推演固结度和压缩度之间的解析关系,并提出从实测沉降过程推算现场土层平均固结系数的方法。虽然地基土的二维、三维固结理论与工程实际更相符,但其指标求取与测定相当困难,因此,太沙基一维固结理论在工程实践中仍得以广泛应用。

McNamee和Gibson^[46](1960)引入位移函数并求解出轴对称荷载作用下单层地基的Biot固结问题。Sandhu和Wilson^[47](1969)利用变分原理推出了Biot固结理论的有限元方程;Booker and Small^[48,49](1977,1987)等人利用Laplace变换推导了Biot固结理论的有限元方程,按矩阵位移法的思路求解出了多层地基的二维和三维Biot固结问题;赵维炳等人^[50](1996)提出了考虑软土黏弹性的一维及轴对称固结普遍解析解;任红林等人^[51](2003)以Biot二维固结问题的弹性解为基础,运用李氏比拟法对各向同性的有限厚地基的黏弹性解进行了分析,并对广义的Voigt模型写出解的具体形式。固结方程给出了一个普遍有效的一般解法,使得问题求解有了较大的进展。褚衍标等人^[52](2008)结合Biot固结理论及自然单元法的特点,利用经典变分原理推导固结微分方程的离散形式,针对二维问题编制计算程序,结果表明自然单元法与解析解较为吻合。刘志军等人^[53](2015)对Biot理论和修正Biot理论中的波动方程进行推导,基于修正Biot理论导出了三种不同形式的波动

方程,得到了 Biot 弹性系数表达式,并分析了两者的应力及对应关系。总之,近年来,国内外根据 Biot 固结理论,应用数值分析方法求解土坝、路堤、挡土结构、建筑物地基等问题,有力地推动了土力学固结理论的发展。

1.2.2.2 微细观领域研究现状

许多学者对不同地区软土的渗透固结特性进行了微细观层面的研究。如张诚厚^[54](1983)认为土颗粒的矿物成分、沉积条件及孔隙水的化学成分都会对结构性产生影响,通过对结构性较强的湛江黏土和结构性较弱的上海黏土的固结试验发现,结构性对土的宏观物理力学特性有重要影响。随后,Locat 等人^[55](1985)对 Grande-Baleine 海积软土、马驹^[56](1993)对天津港东突堤淤泥、Mesri 等人^[57](1995)对 Mexico City 软黏土、龚晓南等人^[58](2000)对杭州淤泥质黏土、孔令伟等人^[59](2002)对琼州海峡湛江海域的结构性海洋土、赵志远等人^[60](2003)对温州软土、王国欣和肖树芳等人^[61](2003)对杭州淤泥、拓勇飞等人^[62](2004)对湛江地区软土、蔡国军等人^[63](2007)对连云港海相黏土、张明鸣等人^[64](2011)对深圳大铲湾吹填淤泥、王军等人^[65](2013)对黏土坝基的试验表明,由于软土具有明显的区域特性,不同地区软土的微细观结构存在显著不同,故其渗透固结特性存在明显的差异性。

1.2.3 土体渗流特性的研究现状

1.2.3.1 宏观领域研究现状

土体中的孔隙水如通过细小而曲折的渗流通道流动时会受到很大的黏滞阻力,导致出现流动缓慢的层流状态。在普通砂土和粉土中的渗流属于层流范围,达西定律均可适用。而众多的监测和试验资料表明,在黏性很大的致密黏土、纯砾以上的粗粒土中的渗流往往会偏离该定律。前者由于黏土中水与颗粒表面会产生相互作用导致渗流偏离达西定律,后者因为土中存在大的孔隙通道,渗透出现紊流状态而导致与达西定律偏离。

许多学者通过试验和理论分析研究达西定律的适用范围,普遍将达西定律的上限确定为临界雷诺数,但由于各人试验所取土样的颗粒形状和排列、孔隙率等参数均有不同,导致试验结果缺乏明显的分界点,结论差异较大。一般来说,作为达西定律上限的临界雷诺数 Re 的取值为 $1 \sim 10$,通常可取中值 5;毛昶熙^[66](2003)认为达西定律有效范围的下限一般指黏土中发生微小流速的渗流,由于细颗粒土表面包裹较厚的结合水膜,结合水膜的流变学特性决定了其软土的渗流规律。对一般黏土而言,作用较大水力坡降时,渗流才会突破结合水的堵塞而发生,其突破结合水的坡降即为起始坡降。当渗透开始后,最初有效过水断面的变动导致其不符合达西线性阻力定律,直到最后渗透断面重构后,才符合线性变化规律。随着黏性土的含水量减少或密实度增加,其起始坡降不断增加,最高可达 30 以上^[66]。

长期以来,学术界就起始坡降是否存在的问题,争议不断。董邑宁等人^[67](2000)通过渗透试验表明萧山原状土有水压差就有渗流,但加荷后土体结构产生变化而存在起始坡降。齐添等人^[68](2007)通过渗流固结试验,认为在加载条件下萧山黏土的渗流流速与水力坡降两者间呈现非线性的关系,但不存在起始坡降。渗透系数是研究饱和土及非饱和土渗流的关键参数,相对饱和土而言,非饱和土渗透系数的实测要困难许多,尤其对于低饱和度时非饱和土,其土中的水极难排出,因此直接测试非饱和土的渗透系数变得相当困难。而利用饱和土渗透系数和非饱和土的土水特征曲线,从理论上间接预测非饱和土的渗透系数,得到了Childs^[69](1950)、Brooks^[70](1964)、Mualem^[71](1976)、Agus^[72](2003)、张雪东^[73](2010)、胡冉^[74](2013)、蔡国庆^[75](2014)等众多研究者的认可和应用,被证实是一种较准确而又便捷的方法。

1.2.3.2 微细观领域研究现状

从1856年达西渗流试验开始起一个世纪左右,学者们对淤泥、淤泥质黏土等软土介质渗流问题的研究主要集中在宏观尺度领域。20世纪60年代后期,中国科学院渗流流体力学研究所率先提出了“微观渗流”思想,随之,非牛顿流体渗流、物理化学渗流、多相渗流方面的探索纷纷展开^[76~81]。众多学者诸如Bear^[82](1983)、Neuman^[83](1990)、黄康乐^[84](1991)、Ghilardi等^[85](1993)、邹立芝^[86](1994)等人在岩土材料渗流尺度效应研究方面进行了有益的探索,但总的来看,其渗流研究的尺度领域仍集中在宏观领域的范畴。

淤泥和淤泥质土等软土与其他多孔介质不同,其主要由极细粒径的黏土胶状物质组成,颗粒粒径达微米级且表面电位有十至数百mV,同时形成了小于十分之几微米^[87]的孔隙。带电水分子能够定向排列并包裹在细小颗粒的表面以形成黏度很大的结合水膜,减小粒间孔隙的等效孔径,以阻止自由水的流动,而结合水膜的厚度可随土颗粒表面电位的改变而改变,使粒间孔隙的等效孔径发生变化,从而改变软土的宏观渗流特性。一直以来,经典流体力学界认为:固体表面上的流体分子与固体表面的相对运动速度为零,被称为“无滑移边界条件”假设,此假设得到了大量宏观实验的验证,并得以广泛应用^[88]。然而,随着微纳米观测技术与分析理论的发展,人们借助原子力显微镜(AFM)^[89]、微颗粒图像测速仪(μ -PIV)^[90]、近场激光速度仪(NFLV)^[91]、表面力仪(SFA)^[92]等多种先进测试技术和手段,发现许多情况下边界滑移现象的发生^[93~95]。研究表明,边界滑移在宏观尺度领域不易发生,但由于淤泥和淤泥质土等极细颗粒土的粒径仅为微米级,属于微观领域研究范畴,此时,颗粒面积为原来的一百万分之一,颗粒体积为原来的十亿分之一,导致其正比于面积的黏性力、摩擦力、表面张力的参数数值是正比于体积的电磁力和惯性力数值的数千倍,因此,学者们认为在极细颗粒黏土的微孔隙中,边界滑移可能对其渗流特性产生重要影响。Churaev等人^[96](1984)通过研究发现边界滑移现象出现在溶凝石英玻璃管中水和水银中。Cho等人^[97](2004)

通过试验观测到固-液接触角很小的憎水性固体表面发生了显著的边界滑移现象。Ou 等人^[98](2004)研究发现,流体在流经布置有规则憎水性微圆柱或微凸肋的微通道表面时产生了很大的边界滑移,从而使流体流动的拖曳阻力降至原来的 60% 左右。王馨等人^[99](2008)针对微纳米间隙下受限液体的边界滑移现象进行试验,发现当微间隙临界尺度小于 6.67×10^{-3} 时,边界滑移效应对流体动压力有重要作用,得出润湿性差的光滑表面的边界滑移长度明显大于润湿性好的表面的结论。由于极细颗粒黏土的孔径可达微米级,水在微孔隙中流动时,会产生“滑移边界”等与宏观流动不同的“微尺度效应”现象。现有文献对微尺度效应的研究表明^[100~102],当孔隙特征尺寸减小到一定尺度时,虽然连续介质假设仍能成立,但原来在宏观流动领域范畴可被忽略的许多因素,将成为主导微孔渗流的主要因素,从而出现与宏观流动显著不同的规律;如孔隙特征尺寸进一步减小到流体粒子平均自由程量级时,基于连续介质的一些宏观概念、假设、规律将不再适用,需要在微观领域重新讨论黏性系数等概念。上述就边界滑移现象的探索为极细颗粒黏土等介质的微细观渗流研究提供了一种新思路,也是今后流体力学发展的新方向之一^[103]。

何莹松^[104](2013)利用格子 Boltzmann 方法,分别从宏观尺度和微观尺度两个角度研究多孔介质中的流体渗流问题,证明格子 Boltzmann 方法在宏观尺度上可以成功模拟工程上的大尺度渗流问题。在微观尺度上,证明格子 Boltzmann 方法以及反弹边界处理格式可以有效模拟微尺度渗流问题,得到了多孔介质中流体的压力分布和流线图。申林方等人^[105](2014)根据土体的孔隙率,采用随机配置的方法建立了二维土体孔隙结构,基于格子 Boltzmann 方法(LBE 方法),通过设置左、右边界及土颗粒边界为标准反弹格式,出入口边界为非平衡态外推格式的边界条件,建立起模拟饱和土体渗流的二维模型,为进一步研究土体微观渗流机理提供了新的有效手段。

1.3 土体工程特性与微细观结构模型关联性研究现状

1.3.1 结构性黏土的微细观结构模型研究

土体结构性是指土体颗粒和孔隙的性状和排列形式(或称组构)及颗粒之间的相互作用,工程中的结构性土地基往往会在无任何预兆情况下突然发生破坏^[106],进而对建筑物或构筑物等建设设施产生强烈影响^[107],因此,建立土的结构性本构模型被认为是 21 世纪土力学的核心问题之一^[108]。

土体的微结构模型实质上是对土体颗粒及孔隙的排列、形状、接触关系的组合方式的一种类型划分。由于研究层次、领域的不同,模型分类的结果也存在差