

多孔介质多场耦合数学模型 及其应用

严俊 王海军 杨阳 著



中国水利水电出版社
www.waterpub.com.cn

多孔介质多场耦合数学模型 及其应用



杨阳 著



中国水利水电出版社

www.waterpub.com.cn

· 北京 ·

内 容 提 要

本书主要述评讨论了与岩土工程、水利工程相关的多场耦合现象及数值分析问题，建立了水-力-热耦合数学分析模型，并列专章系统讨论数值求解过程中参数耦合、变动边界、非对称矩阵集成与存取、方程求解等关键技术问题。

本书可供从事岩土、水利等设计、科研、教学工作者参考。

图书在版编目（C I P）数据

多孔介质多场耦合数学模型及其应用 / 严俊, 王海军, 杨阳著. — 北京 : 中国水利水电出版社, 2018.7
ISBN 978-7-5170-6633-0

I. ①多… II. ①严… ②王… ③杨… III. ①多孔介质—耦合—数学模型—研究 IV. ①0357.3

中国版本图书馆CIP数据核字(2018)第160312号

书 名	多孔介质多场耦合数学模型及其应用 DUOKONG JIEZHI DUOCHANG OUHE SHUXUE MOXING JI QI YINGYONG
作 者	严俊 王海军 杨阳 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 (营销中心)
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	天津嘉恒印务有限公司
规 格	170mm×240mm 16开本 8.25印张 157千字
版 次	2018年7月第1版 2018年7月第1次印刷
印 数	0001—1000册
定 价	45.00元

凡购买我社图书，如有缺页、倒页、脱页的，本社营销中心负责调换

版权所有·侵权必究

前言

对工程中岩土类多孔介质来说,一般情况下是固-气-液三相介质,其中固相决定着岩土体的骨架,是其基本物质成分;液相(如地下水、石油、各种溶液等)一般是其中多场耦合关系最活跃的成分;气相(如空气,天然气,煤矿瓦斯等)往往占据固相和液相之外的空间。而且,岩土体一般都是处于一定的地质环境中,如地下水环境、地应力环境、环境温度等,地质环境的各因素之间相互联系、相互作用、相互制约,形成岩土体渗流场、应力场、温度场等多场耦合效应。

近年来,大量的工程实践,尤其是石油、天然气、地热等资源的开发,深埋隧道和引水隧洞的开挖,核废料的安全填埋、储存,土壤环境工程中污染物的迁移,寒区隧道施工,电渗法软土地基处理,混凝土坝裂缝控制等实际工程中都遇到了多场耦合问题。事实上,岩土类多孔介质多场耦合问题广泛存在于水利水电工程、环境工程、石油开发、地热开发、地震预报与控制、地下工程以及核废料处置等诸多领域,是人类活动和地质环境相互作用研究的重要课题。因此,有必要进行岩土体多相介质多场耦合作用问题研究,既可促进多场耦合问题的理论研究,又对多场耦合力学在岩土及环境工程中的推广应用有十分重要的作用,将研究成果应用于西部大开发中的西南地区水电能源开发等实际工程中可产生巨大的经济效益和社会效益。多孔介质多场耦合理论与数值模拟是一门相对年轻的学科分支,近些年来已有大量学者展开了研究。

本书共分五章,就目前多孔介质多相、多场耦合数值分析方法

中的若干问题开展了较为系统、深入地研究,将多孔介质视为连续、均匀介质,总结了多孔介质的概念,结合多孔介质的概念模型以及各相的热本构关系,以位移、孔隙水压力、孔隙气压力、温度、孔隙率为未知量、建立了包含力学平衡方程、流体质量守恒方程和热能平衡方程的多孔介质的多相、多场耦合控制方程组,并采用加权余量法和有限差分法分别对控制方程组进行了空间和时域的离散,最终建立了非饱和多孔介质的多相、多场耦合过程的有限元支配方程组,在此基础上,对有限元求解的稳定性进行了讨论,给出了最终的有限元计算格式。此外,对多孔介质多相、多场耦合数值分析过程中的一些关键技术问题,如变动边界和复杂边界的处理、复杂等效节点荷载和节点处标量梯度的求解、非对称稀疏矩阵的快速集成和存取方法以及耦合有限元方程的求解方法等,提出了一系列的解决方案,并在此基础上编制了多孔介质多相、多场耦合的有限元计算程序 THM-3D,对其进行了模型验证以及工程应用分析。本书为国家重点研发项目课题“大型尾矿库‘头顶库’成灾模式与防控技术”(2017YFC0804600)、国家重点基础研究发展计划(“973”计划)课题“机场高填方稳定性分析研究”(2014CB047004)成果,该成果还应用于河口村面板堆石坝项目数值模拟分析中。

本书虽然在耦合分析理论模型以及数值求解技术上做了一些探讨,由于水平和时间所限,书中难免存在一些不足之处,真诚欢迎有关专家学者、工程技术人员和广大读者提出宝贵意见。

作者

2018年3月

目录

前言

第1章 绪论	1
1.1 研究背景和意义	1
1.2 多孔介质多场耦合作用的理论架构	3
1.3 多孔介质多场耦合作用模式研究进展	4
1.4 多孔介质多场耦合数学模型研究进展	6
1.5 多孔介质多场耦合数值求解方法研究进展	8
1.6 主要研究内容和研究方法	9
第2章 多孔介质的基本概念和力学分析模型	11
2.1 多孔介质的定义	11
2.2 多孔介质中相的性质及其相互关系	13
2.3 多孔介质的基本物性指标	16
2.4 多孔介质中的应力	17
2.5 多孔介质中液相的流动特性	20
2.6 多孔介质中气相的流动特性	26
2.7 本章小结	26
第3章 多孔介质多场耦合数学模型及有限元离散	28
3.1 多孔介质的概念模型	28
3.2 多孔介质热本构关系模型	29
3.3 多孔介质多场耦合的控制方程	32
3.4 多孔介质多场耦合数学模型的定解条件	39
3.5 多孔介质多场耦合模型的有限元离散	40
3.6 本章小结	51

第 4 章 多孔介质多场耦合数值计算关键技术研究及程序编制	52
4.1 多孔介质的参数耦合模型	52
4.2 变动边界和复杂边界的处理方法	57
4.3 等效节点荷载的计算方法	59
4.4 标量的梯度计算方法	62
4.5 非对称矩阵的集成和存取方法	64
4.6 多场耦合有限元方程的求解方法	68
4.7 有限元程序的开发编制	71
4.8 数值算例	75
4.9 本章小结	82
第 5 章 考虑多场耦合效应的应用分析	84
5.1 深厚覆盖层上高土石坝蓄水后的渗流场与应力场耦合效应分析	84
5.2 大体积混凝土初次蓄水条件下的温度应力问题	94
5.3 本章小结	106
第 6 章 结语	108
参考文献	111

1.1 研究背景和意义

自然界中存在着不同的物理、力学与化学过程，如果这些过程间存在着相互影响，即一个过程的发生与发展将会受到或（和）影响到另一个过程的发生与发展，则称这些过程为耦合作用过程，这种现象称为多场耦合。在物理学上，耦合（Coupling）是指两个或两个以上的体系或两种以上的形式之间通过各种相互作用而彼此影响以致联合起来的现象。

对工程中岩土类多孔介质来说，一般情况下是固-气-液三相介质，其中固相决定着岩土体的骨架，是其基本物质成分；液相（如地下水、石油、各种溶液等）一般是其中多场耦合关系最活跃的成分；气相（如空气、天然气、煤矿瓦斯等）往往占据固相和液相之外的空间。而且，岩土体一般都是处于一定的地质环境中，如地下水环境、地应力环境、环境温度等，地质环境的各种因素间相互联系、相互作用、相互制约，形成岩土体渗流场、应力场、温度场等多场耦合效应。

近年来，大量的工程实践，尤其是石油、天然气、地热等资源的开发，深埋隧道和引水隧洞的开挖，核废料的安全填埋、储存，土壤环境工程中污染物的迁移，寒区隧道施工，电渗法软土地基处理，混凝土坝裂缝控制等实际工程中都遇到了多场耦合问题。

（1）资源开采中的应用。经过近几十年对世界各地各种类型油气资源的大量开采，以及通过大量的实验室和理论分析研究工作，现在对油气藏的力学特征已经形成了一个基本的认识，即认为油气资源的开采过程是一个流体（油、气、水）渗流、温度变化与油气藏岩土类多孔介质弹塑性变形动态耦合作用极强的过程。以煤层气藏为例，煤层气的开采，孔隙流体的压力发生变化，会引起煤岩骨架弹性模量和抗拉强度参数的变化；煤层气的吸附和解吸，煤层温度发生变化，会引起煤层骨架变形参数变化和孔隙流体的流动规律变化；煤层骨架变形，煤层孔隙体积会发生变化，从而引起煤岩物性参数，特别是孔隙度、渗透率、煤岩的密度和孔隙压缩系数的变化。

（2）核废料处理工程中的应用。在高放射性核废料处理的研究中，核废料



被埋于地下岩体,由于放射性同位素衰变,将产生大量的热量。贮库围岩介质温度升高,不但影响了岩体、水体的物理性质,而且对岩体的应力场和水体的渗流场也有重要作用。一方面,地下水作为一种环境因素对岩体的物理力学性质和热对流传输具有重要影响;另一方面,岩体的热物理特性及其中的各种不连续面分别对热传导及地下水渗流起着重要控制作用,这三者相互联系、相互制约的性质是由渗流场、应力场、温度场耦合效应引起的,属于不可逆的热力学过程。因此,建立核废料污染的多场耦合动力学数学模型,寻求其在某种意义下的近似解及建立相应的数值分析理论,对预报、评估污染的方式、范围、程度,及早采取相应的控制措施和废料处理手段有着重大的指导意义。

(3) 水利工程中的应用。在一般水利工程中,多场耦合一般往往退化成两场耦合,如土石坝的固结、高边坡的稳定和深埋隧道的开挖稳定等问题中,通常考虑成渗流场-应力场耦合(即 HM 耦合),这一过程其实是岩土多场耦合的一个特例,即假定这些变化过程是一个等温过程;又如,在大体积混凝土坝体水库初次蓄水过程中,一般仅考虑温度场-渗流场耦合(即 TH 耦合),得到坝体渗流场影响下的坝体温度分布,为温控防裂提供参考依据。

(4) 环境工程中的应用。在城市土壤环境工程中,最常见的是垃圾填埋场,一般都是位于自然土层上,由封顶层、土障层、围岩黏土及废弃物堆积体等部分组成。其中土障主要由特定的夯实黏土构成,其主要作用是防止垃圾废弃物中有害物质(有害水或气体)向土障外的周边环境扩散,对人和自然环境具有很好的保护作用。但是土障包围的固体废弃物本身具有很高的温度或者能够同构化学反应释放热量,为工程土障系统中的热源,土障所用黏土材料的水力-力学性质会随温度而变化,使土障出现不可恢复的塑性应变,对土障的稳定性影响较大。对工程土障的稳定性分析,必然涉及多场耦合问题和化学传质问题。

另外,加油站或地下储油设施等造成的油料泄漏使有机物进入到包气带土壤中,容易给土壤和地下水造成严重的污染。这些有机污染质进入地下环境后,大部分以轻质非水相流体(light non-aqueous phase liquid, LNAPL)的形式污染土壤和地下水。由于轻油难溶于水或与水不混溶的特点,它在土壤和地下水中的迁移特征与一般的溶质迁移存在很多方面的不同;这类污染物一经泄漏进入地下以后,往往同时伴随着不混溶的水或气的共同运动,是孔隙介质中的多相流动问题。其中将会涉及孔隙介质中应力、变形场与多相渗流(油、水、气)场之间的相互影响和作用问题。

(5) 其他应用。另外,多场耦合过程在冻土工程和寒区隧道施工中也都存在:冻土随温度的变化过程中容易形成冻胀和融沉破坏,其冻融过程是典型的温度、应力、渗流相互影响的过程;寒区隧道施工过程中,在衬砌与围岩之间



存在地下水, 温度低于其结晶点时, 会凝结成冰, 体积膨胀, 在岩体和衬砌的约束下, 会产生较大的应力, 容易形成冻胀破坏, 这个过程也是三场耦合的过程。这两类工程问题也需要结合多场耦合的方法来对其进行计算分析, 与一般多场耦合不同的是, 这些工程问题中增加了水与冰之间的相变过程。

综上所述, 岩土类多孔介质多场耦合问题广泛存在于水利水电工程、环境工程、石油开发、地热开发、地震预报与控制、地下工程以及核废料处置等诸多领域, 是人类活动和地质环境相互作用研究的重要课题。因此, 有必要进行岩土体多相介质多场耦合作用问题研究, 既可促进多场耦合问题的理论研究, 又对多场耦合力学在岩土及环境工程中的推广应用有十分重要的作用, 将研究成果应用于西部大开发中的西南地区水电能源开发等实际工程中可产生巨大的经济效益和社会效益。

1.2 多孔介质多场耦合作用的理论架构

在多孔介质多场耦合过程中, 渗流场、应力场、温度场等场与场之间的相互作用关系可以用图 1.1 来简单描述, 其中, a 表示固体骨架应力引起多孔介质孔隙率和渗透特性变化, 目前有经验关系式和理论关系式 (包括各种概化情况、概化模型下的理论关系式) 两大类表示方

法; a' 表示渗透水流对岩土体固相的力学作用, 一般应用有效应力原理来反映; b 表示水流的热对流及与岩土体固相的热交换; b' 表示温度势梯度引起水分运动及与温度有关的水特性变化; c 表示固相力学变形引起热力学特性变化及固相内部热耗散; c' 表示温度引起热应力 (变) 及与温度有关的岩土体固相力学特性变化。

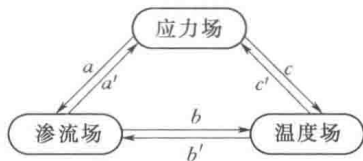


图 1.1 多孔介质多场之间的相互作用关系

可见, 多孔介质多场耦合作用是由固体力学、流体力学、传热学、传质学、物理化学与反应理论等基础学科与众多工程学科相互交叉而形成的新兴边缘学科。按照这个定义, 多孔介质多场耦合的理论涉及多孔介质固体和其中传输的流体的多物理场之间的耦合作用, 其控制方程中包含了场与场之间的耦合作用项, 本构方程中也包含了多物理场与物理量之间的相互作用关系。针对具体工程的多场耦合作用的数学模型, 至少须由两个或两个以上控制方程组成, 因此其求解也变得比较困难, 需要认真研究其数值求解策略, 也需要研究其解的适应性及多场耦合作用带来的新问题。

多孔介质多场耦合作用研究的理论构架主要包含了耦合作用本构模型、控制方程、求解方法与数值仿真实理论与技术、复杂工程与科学问题的研究与决策



等4个方面:

(1) 耦合作用的本构模型, 主要是研究某一物理场本构模型的形式受其他物理场的作用而发生的变化。这是耦合问题研究中最难、最需要资金和最需要做的工作, 离开了它, 所有的耦合作用都将是空中楼阁。

(2) 多孔介质多场耦合作用的数学模型, 主要研究某一物理场方程中因变量或源汇项受其他物理场作用的变化变化的数学描述, 也包括本构规律的影响在控制方程中的反映。这类控制方程包含了必不可少的几个物理场控制方程, 许多时候还包含一个耦合控制方程, 例如, 流固耦合问题中的有效应力方程、固热耦合问题中的热膨胀变形方程、渗流传质耦合问题中的密度与浓度的关系方程。一般地, 可以把相关物理场因变量之间存在耦合作用问题称为强耦合作用, 而把仅有参数耦合, 也就是方程中的系数项有作用的或单向作用称为弱耦合作用。例如, 流固耦合控制方程中, 在固体变形方程中含有流体压力梯度的作用项, 在流体控制方程项中含有固体体积变形作用项, 这类问题可以称为强耦合作用; 又如, 在仅有传导传热的固热耦合问题中, 固体变形方程中含有温度作用项, 而热传导方程中不含有固体位移项, 这种单向的影响称为弱耦合作用。

(3) 多孔介质多场耦合作用控制方程组的求解方法及数值仿真实理论与技术, 它是将多场耦合理论应用于实践的重要步骤。

(4) 借助于耦合数学模型和数值模拟理论与技术, 对此类工程问题的工程方案制订、工程决策的判断和工程与科学规律的掌握提供有力的支撑, 也可进一步提升对复杂物理规律的研究和认识。

以上四个方面即构成了多孔介质多场耦合作用研究的整体架构。

1.3 多孔介质多场耦合作用模式研究进展

严格地说, 多孔介质的多场耦合的作用是由于其中任意两场之间的耦合作用都是双向的, 场与场之间都是互相影响、互相作用的, 因此属于完全耦合作用模式。但是, 在解决实际多场耦合问题的时候, 各研究者都会提出不同的多场耦合模式, 或做一定的简化以满足相应的研究需要。

国外方面, Hicks 等 (1996) 在研究地热能源的储存问题时, 描述了关于干热裂隙岩体的多场耦合作用模式。该模式在实现过程中, 主要考虑了流固耦合 (即 HM 耦合) 和热固耦合 (即 TM 耦合), 考虑了水的流动对温度场分布的影响, 但是没有考虑温度场对渗流场的影响, 如图 1.2 所示 (实线表示考虑了场间的耦合效应, 虚线表示未考虑场间的耦合作用, 下同)。

Chapuliot 等 (2004) 对混凝土在渗流存在的条件下热应力导致的开裂机

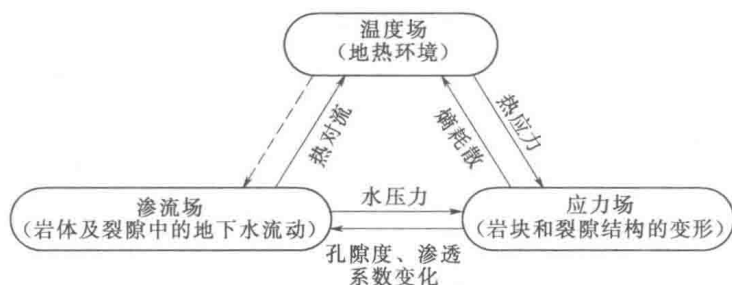


图 1.2 干热裂隙岩体的多场耦合作用模式 (据 Hicks 等, 1996)

理展开了研究, 他们也提出了一种多场耦合模式, 但是该模式也进行了简化, 只考虑温度场和渗流场、温度场和应力场之间的相互作用, 没有考虑渗流场和应力场之间也存在的相互作用和影响, 具体描述如图 1.3 所示。

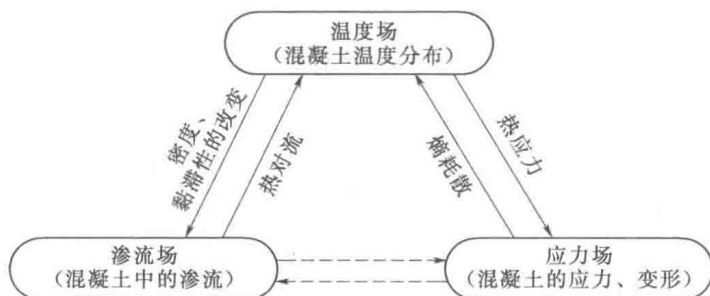


图 1.3 裂隙岩体的多场耦合模式 (据 Chapuliot 等, 2004)

以上是国外研究者针对不同问题所提出的多场简化模式, Millard 等 (1995) 在研究裂隙岩体多场耦合时提出了比较全面的多场耦合作用模式, 其模式如图 1.4 所示。

国内方面, 杨立中等 (2000) 在深层地下水资源量的量测评价中以渗流场为研究主体, 提出了一种三场耦合作用模式, 该模式中只考虑了应力场和温度场对渗流场的影响, 也属于一种典型的弱耦合作用模式, 如图 1.5 所示。

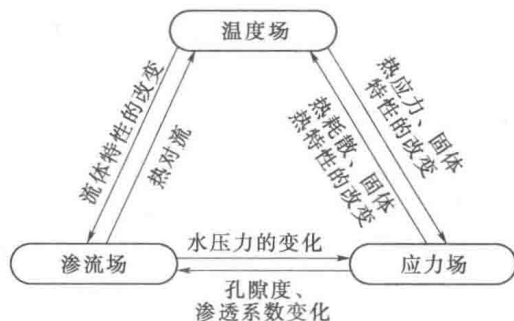


图 1.4 裂隙岩体的多场全耦合模式 (据 Millard 等, 1995)

大连理工大学的武文华等 (2004) 对非饱和土提出了一种多场结构模型, 该模型中结合非饱和土的 CAP 模型综合考虑了三场之间的相互影响, 特别是考虑了温度对非饱和土的水力、力学行为的影响, 诸如温度变化引起的热软化



问题以及温度对水力性质的影响,用结构图 1.6 表示。

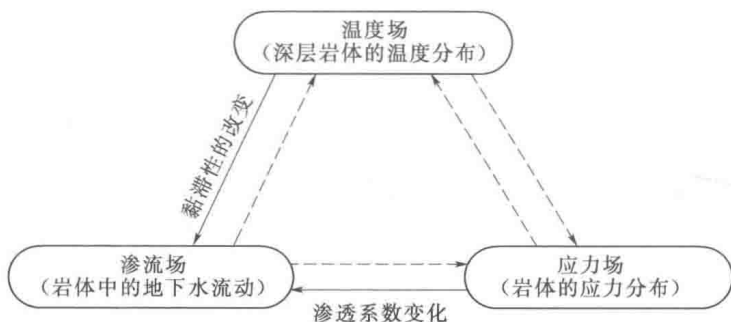


图 1.5 裂隙岩体的多场耦合作用模式 (据杨立中等, 2000)

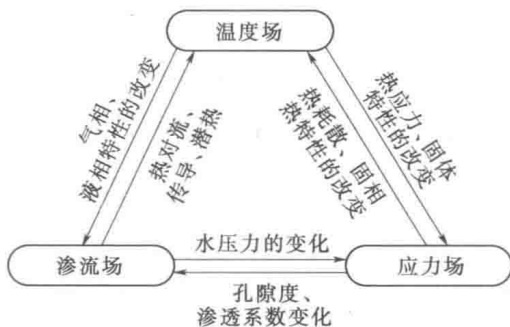


图 1.6 非饱和土体的多场耦合模式 (据武文华等, 2004)

1.4 多孔介质多场耦合数学模型研究进展

饱和-非饱和土(岩)作为在细观上由固、液两相或固、液、气三相组成的多孔多相介质具有非均匀的结构,但为便于数学描述,通常将多孔多相介质假定为均匀连续介质。在此模型中假定每个相均同时充满了饱和或非饱和土(岩)的全域,在介质的每个点假定存在所有各相。这样,就可以运用连续介质力学的理论来建立多孔多相介质二相或三相系统的多场耦合数学模型。目前国内外大多数多孔介质多场耦合数学模型均是基于连续介质理论框架的。同时,由于岩土系统的复杂性,在建立岩土多场耦合数学模型时,根据具体情况可以采用机理分析法、混合分析法和系统辨识法等三种建模方法,建立不同岩体系统的耦合数学模型。

在岩土类多孔介质的多场耦合数学模型的发展过程中,经历了由初期的研究多孔介质饱和状态下的多场耦合情形,发展到现在主要研究多孔介质在非饱和-饱和状态下的多场耦合情形。



国外方面,近些年来多位学者提出了多孔介质的多场数学模型。Nguyen 等(1995)在研究包含热效应的广义 Biot 固结理论的基础之上,提出了适用于饱和孔隙介质的非等温固结的控制方程组,其假设中忽略了地下水的对流作用,以位移 u 、温度 T 和孔隙水压力 p_l 为未知量,得到了相应的耦合控制方程组;Bower 等(1997)将裂隙视为裂隙介质,完整岩体视为连续介质,从而提出了饱和双重介质的多场耦合数学模型,用以求解饱和岩体中的多场耦合问题;Neaupane 等(1999)将气体和液体统一按流体来考虑,进而推导了各向异性的非饱和-饱和和孔隙介质的三场耦合控制方程组;Rutqvist 等(2001)给出了饱和-非饱和介质的多场耦合控制方程的一般形式,该多场耦合数学模型中较为充分地考虑了多孔介质的多相效应以及各场间的相互作用关系。

国内方面,许多学者也在各自研究的基础上提出了多场耦合的数学模型。如赖远明等(1999)根据传热学、渗流理论及冻土力学提出了带相变的多场耦合问题的数学模型。模型中将冻土视为弹塑性介质,考虑了冻土的蠕变性能和膨胀变形引起的冻胀荷载,得到了冻土的多场耦合数学模型;刘亚晨等(2000)从不可逆热力学基本原理出发,对核废料储存库围岩裂隙岩体介质多场耦合问题进行了探讨,并根据热力学的基本原理导出了核废料储存库饱和裂隙岩体介质的多场耦合控制方程组;孔祥言等基于饱和多孔材料小变形情形的线性热弹性理论,考虑了流体和固体密度以及孔隙度随压力和温度的变化关系和液体黏度随温度的变化,给出一组完全而又简明的热-流-固耦合渗流的方程组,鉴于某些耦合过程(如核废料库的安全评估)需模拟几十年甚至更长时间,该方程组突出了应变变量对时间的微分,并讨论了求解方法,以及在不同工程应用中着重给出的某些结果,对其他较为复杂的情形也作了简要的讨论。薛强等基于多孔介质、连续介质力学和多相渗流力学理论,初步探讨污染物在多孔介质中的迁移转化问题,建立多场耦合作用下污染物运移的数学模型,为定量研究和解决环境污染的预测预报问题提供理论根据。其数学模型包括岩土介质变形场方程、流体渗流场方程、介质温度场方程以及污染气体输运的浓度场方程。许鹤华等从地下流体的物理本质出发,主要考虑温度、流速、压力之间的耦合关系,建立了多场相互作用的耦合非线性数学模型。忽略了沉积压实项的影响,同时也不考虑温度源项和压力源项。渗流场中孔隙介质中的流动现象遵守质量、动量、能量守恒定律,建立流体输运方程;温度场中主要考虑由于流体运移引起的热量交换。李宁等在冻土多相介质静力平衡方程,质量守恒原理,能量守恒原理,土骨架与冰颗粒、水之间的传力机制及水、冰之间相变机制的基础上,系统地推导了冻土中土、冰、水三相介质的温度场、变形场、水分场三场耦合问题的微分控制方程。



1.5 多孔介质多场耦合数值求解方法研究进展

在研究多场耦合机理和建立多场数学模型的基础上,国内外很多学者还对多场耦合数学模型进行了有限元离散,并利用大型商业软件或者编制相应的数值计算程序,结合具体的试验成果进行了计算分析。

国外方面,Shao (1997) 采用经典的 Galerkin 法推导出了以位移、水压力和温度为未知量的有限元格式的非线性方程组,在时间域的离散上,引入了坐标与时间的组合方程,编制了有限元程序结合算例进行了验证,结果表明该处理方法可以很好地解决冷水注入和长时效的温度变化等工程问题。Kruis (2010) 在解决核废料处理工程问题的时候,编制了计算源程序,为节约计算多场耦合方程组的时间,还采取了一系列措施,包括采用区域分解的数学方法和开发计算机并行算法,结果证明在保证计算结果合理性的基础上,计算时间大幅度缩减。

国内方面,中科院岩土所的韦立德、杨春和等 (2005) 是在自身建立的多场数学模型的基础上进行了有限元离散,并编制了三维有限元计算源程序,结合算例证明了其程序的可靠性。盛金昌 (2006) 在对建立的多场耦合数学模型进行离散之后,对得到的通式模式的非线性耦合方程组利用数学软件 FEMLAB 进行求解,可以同时得到温度场、渗流场和应力场的分布,并通过对已知的多场的解析解和数值解的算例进行了分析,证明了其求解方法的正确性。

综上所述,通过对国内外岩土类多孔介质多场耦合研究现状的总结,可以看出,关于多场耦合还有许多研究工作有待改进和深入研究,主要如下:

在多场耦合作用机理方面,目前的研究结果,要么是对两两相互耦合进行了相应的简化,弱化了其物理耦合程度;要么是在考虑两两耦合的过程中,只通过一些参数的改变来分析场之间的耦合作用,属于典型的“参数耦合”,考虑的参数也多单一。在研究多场耦合机理的过程中需要将物理耦合过程和参数耦合相结合,物理耦合可以很好地解释不同物理场之间的作用机理,而参数耦合则可以很好地解决多场耦合的数学模型实现,两者不可分开来考虑。

在多场耦合数学模型的建立方面,目前国内外研究者提出了大量的简化假设,这些假设有些是结合具体的问题提出,这样得到的数学模型应用范围较窄;有些提出的假设不具有科学依据,虽然可以使模型大大简化,便于数值计算,但是与多场的实际耦合过程并不符合;因此在建立多场耦合数学模型的过程中,在提出简化假设时,需要依据有关试验结果和经验总结;在结合具体的问题进行分析时,简化也要有依据和支持,这样才能保证提出的数学模型可以很好地与实际情形相符合,由此得到的计算分析结果才更能够反映真实耦合



过程。

另外, 由于多场耦合问题在数值模拟的过程中, 涉及大型稀疏非线性方程组的求解, 开发和应用非线性方程组的解法也是至关重要的一个课题。

1.6 主要研究内容和研究方法

1.6.1 主要研究内容

结合目前国内外研究的现状和不足之处, 本书主要围绕以下 3 个方面具体展开。

(1) 在从岩土类多孔介质饱和-非饱和多场耦合的作用模式、数学模型以及相应的数值解法 4 个方面比较全面地总结岩土类多孔介质多场耦合的国内外研究进展的基础上, 依据质量守恒定律、线动量平衡原理和能量守恒定律 3 个基本原理, 由连续性方程、静力方程和能量守恒方程这 3 个基本方程以及相应的物性方程推导多场耦合的控制方程组, 充分考虑三场之间的相互作用和相互影响, 最终获得以位移、孔隙水压力、孔隙气压力、温度、孔隙率为未知量的多孔介质多场耦合数学模型, 并分析和确定耦合过程中的与未知量相关的参数。

(2) 对得到的岩土类多孔介质饱和-非饱和多场耦合控制方程进行有限元离散, 解决数值模拟过程中遇到的关键性技术问题——复杂边界条件的模拟、大型非对称性矩阵的存储方法、大型稀疏矩阵的求解方法等, 编制相应的数值计算程序, 并结合热井冷却问题以及土柱热固结问题进行数值仿真, 将计算结果与试验结果相比较, 评价数值计算程序的可用性和适用条件。

(3) 结合实际情形, 分别采用一定的简化假设, 将数值计算程序具体应用于水利水电工程中, 以分析水利工程中较为常见的耦合现象: 考虑地下水条件和应力条件下, 对瀑布沟高土石坝进行多场耦合计算分析, 获得高土石坝耦合效应和耦合程度; 选择某一碾压混凝土坝坝段, 对坝段初次蓄水条件下的坝体的多场耦合计算分析, 得到的温度和应力分布可以为后续混凝土坝的裂缝控制提供参考依据。

1.6.2 主要研究方法

(1) 文献阅读。通过大量阅读国内外有段岩土类多孔介质多场耦合试验、作用模式、数学模型及数值解法等方面文献, 掌握本书主要研究内容现有的研究水平, 为开展本书的研究工作打好基础 and 把握方向。

(2) 理论建模。理论建模是本书重要的研究方法。本书主要应用现有的多



场耦合试验成果、耦合机理、场间耦合效应及规律、有限元理论等对本书内容开展研究工作，最终形成了以位移、孔隙水压力、孔隙气压力、温度、孔隙率为未知量的饱和-非饱和多孔介质多场耦合数学模型。

(3) 数值模拟。数值模拟无疑是本书最大的特色也是应用最广泛的研究方法。应用有限元数值模拟方法，本书解决了岩土工程中有关多场耦合的关键性问题。与理论分析和试验相比，数值模拟具有无比的优越性和不可替代的作用。

(4) 工程应用研究。将数值计算程序具体应用于水利水电工程中：考虑地下水条件和应力条件下，对瀑布沟高土石坝进行多场耦合计算分析，获得高土石坝耦合效应和耦合程度；选择某一混凝土坝坝段，对坝段初次蓄水条件下的多场耦合计算分析，得到的温度和应力分布可以为后续混凝土坝的裂缝控制提供参考依据。

本书研究的主要技术路线如图 1.7 所示。

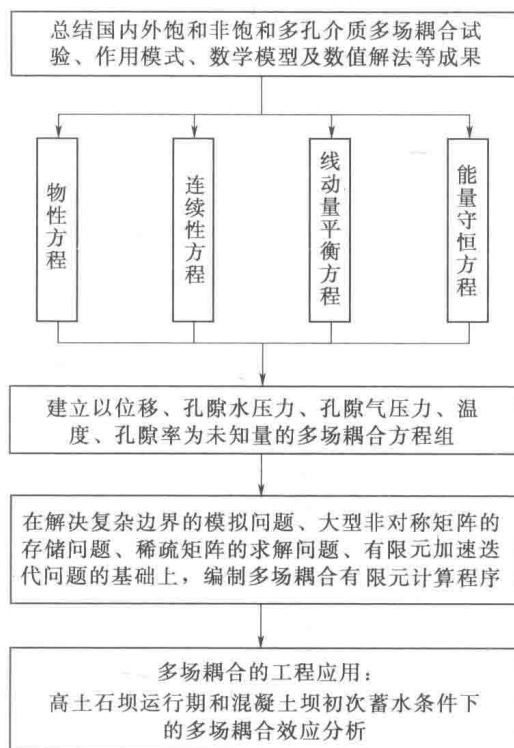


图 1.7 主要技术路线