

# 饱和正冻土水热力耦合模型 及其工程应用研究

何敏 著

BAOHE ZHENG DONG TU SHUI RE LI OU HE MO XING  
JI QI GONG CHENG YING YONG YAN JIU



黄河水利出版社

# 饱和正冻土水热力耦合模型 及其工程应用研究

何 敏 著

黄河水利出版社

· 郑 州 ·

图书在版编目(CIP)数据

饱和正冻土水热力耦合模型及其工程应用研究/  
何敏著. —郑州:黄河水利出版社,2018.2

ISBN 978 - 7 - 5509 - 1997 - 6

I. ①饱… II. ①何… III. ①冻土力学-研究  
IV. ①P642.14

中国版本图书馆CIP数据核字(2018)第044868号

---

出版社:黄河水利出版社

网址:www.yrcp.com

地址:河南省郑州市顺河路黄委会综合楼14层

邮政编码:450003

发行单位:黄河水利出版社

发行部电话:0371-66026940、66020550、66028024、66022620(传真)

E-mail:hhsclbs@126.com

承印单位:河南新华印刷集团有限公司

开本:787 mm × 1 092 mm 1/16

印张:9.75

字数:170千字

印数:1—1 000

版次:2018年2月第1版

印次:2018年2月第1次印刷

---

定价:36.00元

## 前 言

岩土介质热-流-固耦合理论是渗流力学、岩土力学、传热学相互渗透、相互交叉的产物。其多物理场耦合研究开始于 20 世纪 80 年代初期,主要源于石油、天然气、地热、天然气水合物等能源的开发与储存,核废料的安全填埋、储存以及环境工程中污染物的迁移,寒区公路、铁路路基稳定性分析等实际复杂岩土工程问题的需要。近年来,西部寒区重大基础工程建设的加速推进,核废料储库、石油天然气存储、地热能开发等能源开发项目紧锣密鼓的上马,相关热能工程的开挖与安全运行,均与岩土体的水热力耦合环境中的力学与水力学特性密切相关。岩土体多物理场耦合研究逐步发展成为目前岩土工程领域研究的热点与难点之一,而冻土的水热力耦合问题一直是冻土界重点关注的问题,是冻土工程领域最前沿的课题之一及最基础性研究课题之一,具有十分重要的科学意义。

冻土在地球上有着广泛的分布,我国的多年冻土分布面积约占世界冻土分布面积的 1/10,占到中国国土总面积的 1/5。在西部经济快速发展及相应的大规模土木工程新建背景下,广阔的冻土区工程建设中的冻胀及融沉问题日益突出,而广大寒区的众多工程冻害问题本质上是多孔多相岩土介质带相变的固、液、气、热耦合问题,因此开展冻土水热力耦合机制及其理论应用研究对社会发展、国民经济具有十分重要的意义。

近年来,有关冻土变形场、渗流场及温度场耦合作用的研究取得了较大进展,但这些研究远不能满足实际工程问题的需要,尤其缺乏相对完整成熟且可应用于工程实际的分析平台,十分有必要对其开展针对性研究。全书共分为 7 章:第 1 章,分析综述国内外冻土力学的发展历史与进展,重点总结了现状研究和应用的不足,提出了待解决的问题、新的研究思路、技术路线等;第 2 章,根据多孔多相介质力学研究方法,通过对冻土多孔多相微元体的平衡方程、各相成分之间的变形协调方程进行分析,推导了冻土体单元连续性方程及各相成分的能量转换与传递方程,建立了全面考虑冻土中土骨架、冰、水三相介质的水、热、力与变形的真正耦合作用的饱和正冻土的水热力耦合理论框架;第 3 章,通过引入动态内变量应变速率与温度变化速率构成的耗散势,建立了冻土骨架考虑温度影响的黏弹性本构关系,并将其纳入饱和正冻土水热

力耦合模型中;第4章,结合实测冻土工程相变温度场的特点,引入了采用扩展有限元求解冻土工程带相变瞬态传热温度场的方法,阐述了带相变传热问题的扩展有限元程序设计与应用;第5章,在建立的理论构架下,针对饱和冻土体的三场全耦合控制微分方程组,进行了扩展有限元解析,建立了相应的数值模型与分析方法,并在充分剖析引进的奥地利大型岩土工程分析系统FINAL源程序的基础上,针对冻土力学与工程分析的特点与难点,开发出了冻土工程三场耦合分析系统3GEXFEM;第6章,以徐学祖、M. Fukuda的试验资料为基础,对已开发的分析软件系统3GEXFEM进行了全面的验证,在该软件得到试验验证的基础上,针对清水河大桥桩基问题及214国道花石峡冻土路基进行水热力三场耦合分析。

在本书研究过程中得到西安理工大学李宁教授、谢定义教授、邵生俊教授、党发宁教授、胡再强教授、刘奉银教授、范留明教授、陈蕴生副教授、袁继国副教授、丁卫华副教授、陈存礼教授、崔中兴教授、张志强副教授等的帮助和指导,特别向他们表示深深的谢意。另外,陈飞熊、刘乃飞、张鹏、姚显春、朱才辉、曲星、张承客、吕高、李国锋等博士,冯孝鹏、户莹、岳黎斌、邝静静等硕士也为本书做了许多具体工作。

在本书的编写过程中,参考和引用了国内外大量学者的相关研究成果和学术观点,也吸收了同行们的劳动成果,在此谨向各位学界前辈表示衷心的感谢!

本书研究内容得到了国家自然科学基金创新群体(40821001)的资助,在此表示衷心的感谢!

由于作者水平有限,书中难免有疏漏之处,敬请读者批评指正。

作者

2018年1月于西安

# 目 录

第 1 章 绪 论 .....	(1)
1.1 研究背景与意义 .....	(1)
1.2 研究现状 .....	(2)
1.3 研究思路与主要内容 .....	(9)
第 2 章 正冻土的多孔介质理论框架 .....	(11)
2.1 引 言 .....	(11)
2.2 定 义 .....	(11)
2.3 控制微分方程 .....	(12)
2.4 正冻土中的水分驱动力模型 .....	(20)
2.5 小 结 .....	(27)
第 3 章 准饱和正冻土水热力改进耦合模型 .....	(28)
3.1 引 言 .....	(28)
3.2 饱和正冻土水热力耦合理论框架剖析 .....	(28)
3.3 考虑温度影响的黏弹性本构关系的建立 .....	(30)
3.4 基于温度影响的黏弹性本构关系的正冻土水热力耦合模型 .....	(36)
3.5 小 结 .....	(51)
第 4 章 带相变瞬态温度场问题扩展有限元解析 .....	(52)
4.1 引 言 .....	(52)
4.2 纯物质相变瞬态传热问题描述 .....	(52)
4.3 冻土工程相变温度场特征 .....	(54)
4.4 相变问题的求解方法 .....	(55)
4.5 冻土工程分区相变问题求解新方法 .....	(58)
4.6 带相变传热扩展有限元程序验证 .....	(75)
4.7 小 结 .....	(78)
第 5 章 耦合模型扩展有限元解析及程序设计 .....	(79)
5.1 耦合模型扩展有限元解析 .....	(79)
5.2 耦合模型扩展有限元分析程序设计与开发 .....	(94)

5.3 小 结 .....	(96)
<b>第6章 模型验证及应用 .....</b>	<b>(98)</b>
6.1 室内试验验证 .....	(98)
6.2 工程应用案例 .....	(118)
6.3 小 结 .....	(138)
<b>第7章 结论与展望 .....</b>	<b>(139)</b>
7.1 理论建模方面 .....	(139)
7.2 数值分析程序开发及应用 .....	(140)
7.3 进一步工作的设想和展望 .....	(140)
<b>参考文献 .....</b>	<b>(142)</b>

# 第1章 绪论

## 1.1 研究背景与意义

冻土在地球上有着广泛的分布,我国的多年冻土分布面积约占世界冻土分布面积的十分之一,占中国国土总面积的五分之一,主要分布在三大气候区,即东部季风区、西北干旱区和青藏高旱区。在我国西部大规模开发和建设中,西部特殊的岩土力学问题制约了西部基础设施建设(交通、能源、水利、建筑、矿山等)的正常开发和安全运行,引起了专家、学者们的关注。文献[1~3]对西部建设中的特殊岩土力学问题进行了分析讨论,认为:西部基础设施建设中的黄土力学问题、西部交通建设中的冻土力学问题、西南强构造区节理裂隙岩体介质力学问题和西南高地震烈度区的岩体动力学问题是我国西部建设中最具有代表性的四大特殊岩土力学问题。

在西部经济快速发展及相应的大规模土木工程建设背景下,广阔的冻土区工程建设中的冻胀及融沉问题日益突出,主要表现为工业民用建筑基础的冻胀和融沉引起的建筑物开裂,铁路、公路路基的融沉、翻浆波浪、坑槽、松散和局部沉陷、纵裂和横裂,隧洞衬砌支护结构的冻裂与挂冰,各类工程边坡失稳等现象时有发生。冻土区代表性工程青藏铁路格尔木至拉萨段,全长1 118 km,多年冻土区长度为632 km,其中大片连续多年冻土区为440 km,不连续多年冻土区82 km,86%的路线在海拔4 000 m以上,而青藏高原的多年冻土大多为高温冻土,极易受工程建设的影响产生融沉,进而影响路基运行安全。而我国西部广大寒区的众多工程冻害问题本质上是多孔多相岩土介质带相变的固、液、气、热耦合问题。岩土介质热-流-固耦合理论是渗流力学、岩土力学、传热学相互渗透、相互交叉的产物。其多物理场耦合研究开始于20世纪80年代初期,主要源于石油、天然气、地热、天然气水合物等能源的开发与储存,核废料的安全填埋、储存以及环境工程中污染物的迁移、寒区公路、铁路路基稳定性分析等实际复杂岩土工程问题的需要。尤其近年来,西部寒区重大基础工程建设加速推进,核废料储库、石油天然气存储、地热能开发等能源开发项目紧锣密鼓地上马,开挖与相关热能工程的安全运行,均与岩土体的水热

力耦合环境中的力学与水力学特性密切相关。岩土体多物理场耦合研究逐步发展成为目前岩土工程研究的热点与难点之一,而冻土的水热力耦合问题一直是冻土界重点关注的问题,是冻土工程领域最前沿的课题及最基础性研究课题之一,具有十分重要的科学意义。

近年来,有关岩土体中变形场、渗流场及温度场耦合作用的研究取得了较大进展,但这些研究远不能满足实际工程问题的需要,尤其缺乏相对完整成熟可应用于工程实际的分析平台。本书将研究对象定位于饱和正冻土体,从研究冻土温度、水分及变形耦合作用机制出发来分析广大寒区工程建设过程的冻胀融沉问题,试图在吸收改进现有冻土体水热力耦合作用研究的基础上,并着眼于工程实际应用,建立便于实际工程应用的冻土工程水热力耦合分析平台。

## 1.2 研究现状

### 1.2.1 冻土的宏观力学性质的研究现状

从崔托维奇的第一部《冻土力学》问世以来,出于广大寒区工程建设的实际需要,对冻土的宏观力学性质的研究取得了显著成果。冻土的强度和蠕变特性是冻土工程设计的重要指标,也是冻土力学领域研究的重点内容之一。无论是冻土的强度还是蠕变都主要取决于冻土所处的自然条件(土质因素、水分因素、温度因素)及工程条件(载荷因素、结构因素)。

一般认为冻土的力学性质主要与胶结冰有关,冻土中的冰属于多晶冰。胶结多晶冰的强度受温度、初始含水量、应变速率、压力以及冰晶的大小、结构和方向等许多因素的影响。已有研究表明,随温度的降低冰的强度增加,冰晶大小、方向、密度和结构的变化也对冰的强度有着显著影响。H. A. Tsytovich、S. S. Vialov 研究表明冻土的抗压强度随温度降低而增大,并与温度呈指数关系。吴紫江、陈湘生分别研究了含水量对冻结兰州黄土及冻结黏土抗压强度的影响,发现当含水量处于饱和状态或塑限以内时,冻土的强度随含水量增大而增大,超过饱和状态含水量或塑限时,冻土的强度随含水量增加而减小;何平提出冰饱和度概念,进一步从机制上解释了含水量对冻土强度的影响。Saylesa 和 Bragg 研究表明,冰的强度随着应变速率的增大而增大,破坏类型上从开始的塑性破坏转变成脆性破坏;朱元林经过系统的研究,得出类似结论。Chen(1988)、吴紫汪(1983)等学者指出,冻土的强度随围压的增大而增大,但

随着围压的进一步增大,当超过某一临界值时,指出强度会略有降低。Zhu 和 Carbee(1984,1987)的研究还表明,起始切线模量随应变速率的增加或温度的降低而增加。Miller(1960)、Sayles(1973)等指出冻土长期强度主要受土颗粒间的摩擦力和黏聚力的影响。Ladanyi(1985)、Ma Wei(1993)研究发现在小于破坏强度的常荷载作用下,伴随着冰相逐渐发生变形,冰所承担的部分应力逐渐转移到土骨架上,土骨架应力逐步增大,直至土骨架达到它的摩擦阻力极限,若超过此长期强度极限,冰在土骨架中的作用主要是发挥黏聚力特性,而土体将继续变形直至破坏。Simonsen 等(1974)、Jones 和 Parameswari(1983)、Fish(1991)、Ma Wei(1993)等学者还指出,在较小的围压作用下,冻土中的颗粒接触处的冰先融化成水,随后向低应力区转移;但当冻土体承担过大的围压作用时,冻土土骨架结构将发生破坏,冰相整体压融,冻土强度随之显著降低。Goughnour 和 Andersland(1968)、Chamberlain 等(1972)、Sayles(1973)、Ting 等(1981、1983)对冻结砂土剪切特性研究后发现,在剪应力作用下,冻土的强度实质上是由冰的强度、土的强度和土骨架与冰之间共同强化作用所制约的结果。根据冻土强度特性的上述研究成果,人们提出了许多强度准则,Terzaghi 和 Peck(1968)建立了线性的 Mohr - Coulomb、Drucker - Prager(1952),Vyalyov(1981)等建立了 Von Mises 准则;Ladanyi(2000)认为冻土的破坏可用于时间、温度有关的莫尔 - 库伦理论表征,即冻土的  $c$ 、 $\varphi$  是时间与温度的函数。Fish(1991)考虑了围压作用下冰融化对冻土抗剪强度的影响,建立了与围压相关的抛物线型屈服准则。马巍通过大量的三轴抗剪试验结果,建立冻土三轴蠕变抛物线破坏准则。李洪升将断裂力学理论引入到冻土力学研究中,给出了冻土断裂韧度的测试方法,对冻土的断裂特性进行了较系统的实验研究,得出了  $K_{II}$  与温度、加荷速率关系,并通过微裂纹演化规律和裂纹密度作为表征冻土状态和变形性质的主导因素,建立了冻土广义强度破坏准则,进一步拓展了冻土的强度理论。

在外荷载作用下,冻土的变形过程表现为明显的蠕变过程,学者们提出了各类恒温及恒载条件下的经验蠕变理论:最早的冻土蠕变模型由 Vyalyov(1959)提出,他引用金属蠕变的陈化理论来描述恒温下冻土蠕变过程的衰减蠕变方程以及用黏弹性理论描述的冻土变荷载时的继承蠕变理论。Ladanyi(1972)提出了线性工程蠕变理论,用于长期强度及蠕变预报,较 Vyalyov 第一蠕变模型简单。Fish(1980,1981)基于速率过程理论和热力学理论,提出了描述蠕变全过程的速率过程模型,Ting(1983)提出了经验性的全过程的蠕变模型。Zaretskiy(1983)、Andersland(1985)利用简化的黏塑性强化模型计算冻土

蠕变,由于需要确定加载面,很难测到蠕变参数,只能采用经验方程,实用性很小。朱元林(1986)提出了修正的 Assur 模型来描述冻土蠕变全过程。盛煜考虑荷载和温度变化情况的蠕变试验研究表明,在恒温增应力条件下,冻土的衰减蠕变过程只能用老化理论、硬化理论和遗传蠕变理论来描述,而冻土的非衰减蠕变过程只能用硬化理论和流动理论来描述。王延栋(1995)、吴紫江(1996)通过光弹性模拟试验研究了冻土蠕变过程,从线性黏弹性理论出发,确定了冻土及光弹性模型的蠕变参数,并建立了对应的冻土的蠕变模型。苗天德等采用“复型-电镜”方法,观测了兰州黄土不同历时、不同荷载及不同温度下冻土蠕变过程的微结构变化,发现冻土蠕变过程中土颗粒重新定向、微裂隙出现、扩展并逐步聚集,并基于含冰量、颗粒定向因子及面积损伤因子等建立了冻土蠕变的微结构损伤理论。随着对冻土蠕变机制研究的深入,这些模型还可以得到进一步的发展完善,以满足工程的需要。

综上所述,冻土的宏观力学性质及工程性质主要受温度、含水量、冰晶结构、土颗粒粒度及外荷载方向及大小、加载速率、孔隙特征、土体饱和度等多种因素的影响。从 20 世纪 80 年代以来,冻土强度研究出现了从以往局限在冻结土的范围内冻土力学性质因素分析到考虑水、热迁移耦合机制研究的转变。

### 1.2.2 正冻土的水分与热质迁移的研究

冻土的热质及水分迁移决定了冻土的冻结和融化过程,直接影响冻土的冻胀和融沉性质,是冻土物理学的基本内容。而冻土中水热迁移现象的试验和理论研究已有很长时间,最早可追溯到 19 世纪末期,但直到 20 世纪 60 年代初期,国际土壤学会提出水分势能的概念以后,相关研究才有显著进展。

冻土中的水分迁移是由于其受力不平衡引起的,它受到作用力、物理和化学等诸多因素的影响。徐学祖总结了国外先后提出的描述冻土水分迁移驱动力的多种假说:①毛细力;②静水压力;③结晶力;④气态水位移;⑤气压液泡;⑥吮吸力;⑦渗透压力;⑧电渗力;⑨真空抽吸力;⑩化学势;⑪冻结锋面的孔隙水压降低;⑫冻结带中的孔压梯度;⑬冻结带这自发孔隙充填;⑭冰压力梯度。其中,最有影响的是 EVerett 提出的毛细理论和 Лебедев 与 Beskow 提出的薄膜理论及由其衍生的吸附-薄膜理论。Лебедев(1919)、Beskow(1925)等提出了细颗粒土中的薄膜水迁移理论。Beskow 把薄膜水迁移理论发展为吸附-薄膜理论,这种理论假说把吸附力和薄膜水迁移理论结合起来,认为介于冰相与土颗粒间之间的未冻水薄膜与温度有关,薄膜的厚度随温度变化而变化,未冻水从临近温度较高、未冻水薄膜厚度较厚、水分子较活跃处向温度

较低、未冻水薄膜较薄处迁移,其本质上体现了冻土中未冻水和冰的动力平衡原理,这种理论被 Hoekstra(1966) 等的试验所证实,目前得到了大多数学者的认可。

冻土中的水分迁移分为两类:一类指由于压力(重力势)造成的渗流运动,一般满足层流的条件,可用 Darcy 定律描述;另外一类是指包括温度势、化学势、溶质势、电位势等作用下的水分迁移。未冻土温度势引起的未冻水分的迁移已经被诸多学者的试验所证实。

多孔介质中的热量传输有三种基本方式:传导、对流及辐射。正冻土的热量迁移按其机制可以分为两类:一类是指温度梯度作用下以热传导方式进行的热量迁移,是冻土中热质迁移的基本方式;另一类主要是指由于冻土中水分迁移引起的热对流作用及冰水相变引起的热量迁移。在相变区,水分迁移引起的热对流及冰水相变释放的潜热量在热量传输的方式过程中发挥着重要作用。

### 1.2.3 多孔介质岩土体水热力耦合作用与机制的研究

水热力三场耦合分析首先在土力学和岩石力学方面发展起来。Aboustit 等较早推导了热和渗流的间接耦合方程式,用有限差分法对一维砂土柱固液热耦合变分原理分析,但没有考虑热对流的作用,忽略了水的压缩性及热膨胀性;McTigue 提出了考虑液体和土体骨架部分的可压缩性及各相的热膨胀性的有关三场耦合理论,但模型仍是一种线性理论,也没有考虑热对流影响。Noorishad 等分析饱和裂隙岩体力学、渗流与热现象时,首次提出了水热力耦合的概念,但该模型并没有考虑非饱和特性,忽略了孔隙水的可压缩性及热膨胀性,而且考虑弹性介质;一些考虑非饱和、非线性弹性,孔隙水的可压缩性,土骨架变形等三场耦合。

Thomas 等建立了非饱和土水热力耦合模型,模型中考虑了热水、水蒸气及空气传输相互作用;Gatmin 提出了非线性弹性饱和土体水热力耦合模型,该模型最大的优点在于考虑了土体介质的非线性弹性,考虑孔隙水的可压缩性和热膨胀性及对热对流。

近年来,瑞典、美国、英国、法国、日本等国家学者开展了大型国际合作项目 DECOVALEX 的研究计划,在水热力耦合数学模型、数值模拟及现场试验方面取得了大量的新成果。

众多研究者根据研究对象的不同,提出了各种三场耦合作用机制。Hart 等(1986)提出了水热力完全耦合相互作用机制(见图 1-1),Jing、Guvanasen 等

在研究核废料储库裂隙岩体多场耦合问题时,给出了各自的热-液-力耦合过程(分别见图 1-2、图 1-3)。

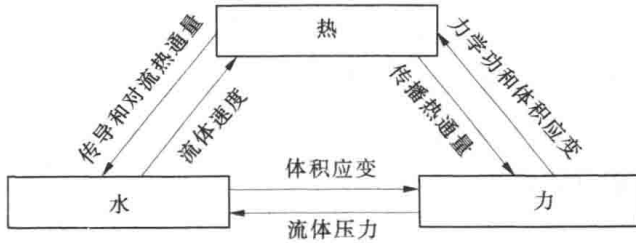


图 1-1 水热力完全耦合相互作用机制 (Hart, 1986)

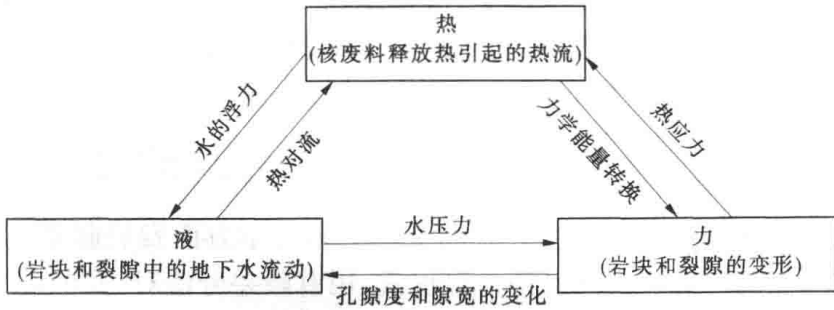


图 1-2 裂隙岩体中的热-液-力耦合过程 (Jing 等, 1995)

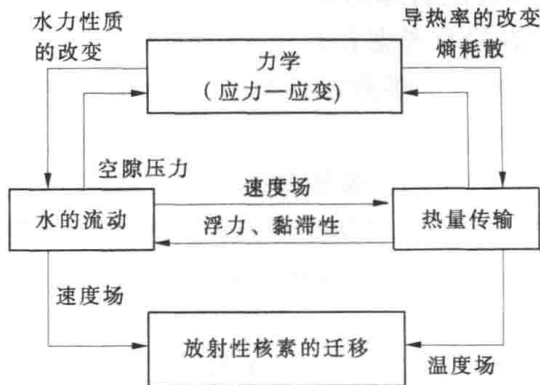


图 1-3 热-液-力过程之间的相互关系 (Guvanasen 等, 2000)

事实上,岩土体温度场、渗流场和变形场耦合机制十分复杂,三场两两相耦合:①变形场、渗流场的相互作用关系一般通过有效应力原理体现出来。在

有效应力作用下,土骨架之间受压缩,从而使孔隙度和裂隙隙宽改变,孔隙水从孔隙或裂隙中流出。由于孔隙或裂隙隙宽的改变,岩土体的渗透系数也发生改变,渗透压力也随之变化,岩土体变形相应改变。②渗流场、温度场之间的相互作用主要表现为渗流场是温度传播的载体,通过传导,液体流动引起的对流传热。流体的物理力学参数如渗透系数、流速、密度计比热容、热传导系数等,都会不同程度影响温度场的分布;反过来,温度值分布也影响流体的物理力学参数,导致渗流场的重分布。③温度场与变形场的耦合主要体现在两方面,一方面,岩土骨架是温度传播的载体,通过固相传导输热,固相的结构性、参数、热传导系数、比热及变形或吸收的能量都会影响温度场的分布;另一方面,温度场分布直接影响土骨架应力场分布,从而导致岩土体变形。

本书作者所在的课题组针对西部冻土工程中的多孔介质水热力耦合数学模型及现场试验与数值模拟方面,分析了多孔多相介质的代表性体元的受力机制,水分迁移机制、相变过程、温度热能与变形能守恒及冻胀变形机制等基本细、宏观热力学特性;构建了正冻土的水热力耦合机制构架,将土体这种连通率极高的多孔介质的水热力耦合机制研究推进了一大步,但以上研究大都存在局限,即介质是饱和,且介质均按照弹性考虑。

#### 1.2.4 冻土体水热力耦合作用研究

从20世纪50年代后期至今,众多国内外学者对寒区冻土水热迁移问题进行了比较深入的分析研究,提出了各种水热力耦合模型:

(1)Chen和Wang(1988)等在冻胀的物理本质基础上,考虑冻胀经验公式,从而建立起各种半经验模型。

(2)Harlan在研究土壤冻融过程中土中水分重分布及地下水位变化时,建立了冻土中热质迁移与水分迁移相互作用模型,把复杂的冻土冻胀融沉机制归结在冻土中的未冻水含量随温度变化的关系上,通过引入土水特性曲线及土壤冻结特性曲线而使方程达到封闭,Outcalt、Taylor和Luthin将冻胀计算引入“流体动力学”模型中,通过临界含冰量值,描述冻胀产生过程。“流体动力学”模型由于能够对水分迁移、温度场变化等进行比较方便的数值模拟,得到广泛的应用。但该模型的主要研究目的不是模拟冻胀,而是以计算温度场、未冻水含量的重分布为主,对于存在较为显著冻胀的冻结过程及冰透镜体的形成这一过程难以描述。

(3)J. F. Nixon (1991)、D. Sheng (1995)等学者,基于次冻胀理论与冰分凝理论,直接以计算冻胀为目的,提出和发展了在不可变形的“刚性”冰和线

性稳定温度场假定基础上的刚冰模型及分凝势模型;刚冰模型及分凝势模型的基本方程为热量、质量守恒方程,与“流体动力学”模型不同,在质量守恒方程中引入了冰透镜体移动的影响,并对冻胀进行模拟。国内学者曹宏章基于刚性冰的思想对该模型进行了进一步发展,通过试验结果验证了模型的合理性。周扬基于冰分凝理论的思想提出了描述活动透镜体生长稳态的分凝温度类比法,建立了描述活动透镜体生长瞬态过程的水热耦合模型,探讨了冻胀控制方式。但由于这些模型输入参数较多,较为复杂,模型着重于描述小尺度冰透镜产生及发展过程,且均为一维的,难以推广到工程尺度的大规模数值计算,大大限制了这类模型的发展。

(4) Duquenois (1989)、Fremont 和 Mikko (1990)以多孔多相介质的混合物理论为基础,通过场方程与熵不等式等热力学基本方程,进而得到了各相的本构方程,建立起了冻土微元体中土、冰、水三相介质热力学水热力耦合模型。苗天德从热力学、混合物理论的角度出发,建立了土体冻结过程的控制方程,可以模拟水分迁移与热质迁移的耦合机制;已冻区的控制方程与经典热传导方程一致,但在未冻区的方程却是一个非线性的 Burgess 方程,其建立了描述冻土体系及冻土经历的一切过程的热力学模型,其体系相当复杂,模型的方程体系是从一般公理出发建立的,正确性是不言而喻的,但应用于工程实际,则还需要深入研究如何对模型进行简化。

(5) 张玉军等建立了考虑饱和 - 非饱和介质的二维三场耦合模型,考虑了膨胀力但未考虑除水外其他各相的连续方程。许强根据 R. L. Harlan 水热耦合模型等推导了温度场方程和体积应变计算公式,但未建立起真正的三场耦合控制微分方程,且未考虑温度变化对土体变形的影响。宁建国、朱志武从材料细观机制出发,建立含损伤冻土本构关系及水热力耦合的数学力学模型。何平建立了冻土黏弹塑损伤耦合本构理论,并在此基础上考虑冻结条件及水分驱动力等构建了冻土水热力耦合控制方程。陈波、李宁等推证了多孔介质三场耦合数学模型微分方程,开发了相应的三场耦合分析软件 CDST,并验证了该软件的可靠性。然而这些模型中对相变潜热以及温度梯度引起的水分迁移等问题还考虑不足,相关模型的实用化数值分析软件报道也较少。

(6) 陈飞熊、李宁根据传统的多孔多相介质力学研究方法,推导出了冻土体的有效应力原理、连续性方程及各相成分的能量转换与传递方程,其整体思路遵守了热力学、混合物理论的一般公理,模型力学概念清晰,抓住了饱和正冻土水热力耦合中的关键要素,从而使得该模型推向实际工程应用迈出了实质性的步伐。

但该模型中材料本构关系采用了简单的线弹性,模型具体求解过程中并没有考虑冻土的非饱和特性及水分迁移引起的热对流问题,且采用传统有限元方法进行求解,难以处理移动的相边界问题,限制了模型的进一步的实际工程应用。

### 1.3 研究思路与主要内容

从前面的论述知道,土体的冻结过程是极其复杂的综合问题,众多研究者已经建立了理论上相对成熟的饱和正冻土水热力耦合模型,但从模型工程实用性来说还不尽如人意。陈飞熊与李宁在传统土力学基础上建立的饱和正冻土温度场、水分场和变形场三场耦合框架,是迄今为止较为完善的水热力耦合模型。

但该模型采用了简单的线弹性理论,具体工程应用中存在由于移动的相边界导致传统有限元格式求解困难等问题,模型求解过程尚未考虑水分迁移引起热对流及尚未考虑冻土非饱和特性等,大大限制了模型的工程应用推广。针对以上问题,本书以已有的饱和正冻土温度场、水分场和变形场三场耦合构架为基础,进行了以下研究:①增加冻土骨架温度影响的黏弹性本构关系;②增加了模型对准饱和冻土特性的适应性;③进一步考虑了冻土融沉过程中水分迁移引起的对流传热现象、冻土骨架黏弹性耗散及热力耦合耗散;④针对耦合过程由于相变导致材料分区界面不断移动的特点,结合计算力学最近进展,引入了扩展有限元进行解析的新方法。

本书的主要研究内容如下:

(1)通过引入冻土冻结融沉过程中动态变量应变速率 $\dot{\varepsilon}$ (或应力速率 $\dot{\sigma}$ )与温度变化速率 $\dot{T}$ 构成的黏弹性耗散势,建立考虑温度影响的黏弹性本构关系,并将新的本构关系纳入正冻土水热力耦合模型中。

(2)通过将冻土体的变形分为由外荷载引起的变形及温度梯度引起的变形(水分迁移,热胀冷缩效应、冰水相变引起的体积膨胀、温度及压力变化引起水体及土颗粒的密度变化)两类,根据多孔多相介质理论,建立外载及温度共同作用下冻土骨架的质量守恒方程。

(3)通过考虑各相的热传导、冻土骨架的黏弹性耗散及热力耦合耗散、热胀冷缩效应、冻结融沉过程中冰水相变及水分迁移引起的热对流等主要因素,建立起多种因素相互作用、相互影响的能量守恒方程。

(4)结合实测冻土工程相变温度场的特点,建立采用扩展有限元方法进

行饱和正冻土水热力耦合模型求解的方法,推导饱和正冻土水热力耦合模型扩展有限元求解格式。编制带相变传热问题的扩展有限元程序,并通过与经典一、二维 Stefan 问题解析解的对比,验证方法的正确性、合理性和先进性。

(5)借鉴大型有限元 Final 源程序及 3G2001 冻土耦合模型分析平台的基本思想,设计扩展有限元分析程序中的数据结构及控制结构,结合耦合模型的特点,开发冻土工程改进三场耦合分析程序。针对经典室内冻胀试验进行数值模拟分析,并结合试验及前人的研究成果进行全面的、系统的检验与验证,验证开发分析程序的合理性与先进性。

(6)利用建立耦合模型及开发的程序对清水河大桥桥桩进行水热力耦合分析,研究其钻孔灌注桩承载力影响因素及内在热力学机制;同时,对 214 国道花石峡试验路在不同影响因素下的地温变化和路基路面变形总量分别进行了计算分析。