

# 中国冻土力学研究 50 a 回顾与展望

马 巍, 王大雁

(中国科学院寒区旱区环境与工程研究所冻土工程国家重点实验室, 甘肃 兰州 730000)

**摘 要:** 中国多年冻土和季节冻土面积分别占国土面积的 21.5% 和 53.5%。在这些地区, 地表层都被一层冬冻夏融的冻结-融化层覆盖, 作为地基的冻结-融化层, 在其冻融过程中土体性质受气温的变化直接影响着上部建筑物的稳定与安全, 因此, 在冻土地区进行水利工程、工业与民用建筑及交通运输工程的建设, 就必须对冻土及其与工程建筑物相互作用的一系列工程冻土学理论和实践问题做出解答, 以确保冻土地基上工程建筑物的稳定性、耐久性 & 经济合理性。简要回顾了冻土力学的起源和发展过程, 阐述了冻土力学在强度与变形、本构模型研究、水热过程研究、冻土与结构物相互作用研究及冻土力学测试技术的发展等 5 个方面的成就, 并根据冻土力学学科特点、工程建设对冻土力学发展的要求以及相关学科的发展趋势, 展望了冻土力学未来的发展方向。

**关键词:** 冻土力学; 成就; 冻土强度; 冻土水热过程; 冻土本构模型

**中图分类号:** TU47      **文献标识码:** A      **文章编号:** 1000-4548(2012)04-0625-16

**作者简介:** 马 巍(1963-), 男, 研究员, 博士生导师, 主要从事冻土力学与寒区工程的研究工作。E-mail: mawei@lzb.ac.cn。

## Studies on frozen soil mechanics in China in past 50 years and their prospect

MA Wei, WANG Da-yan

(State Key Laboratory of Frozen Soil Engineering, Cold and Arid Regions Environmental and Engineering Research Institute, CAS, Lanzhou 730000, China)

**Abstract:** China has a land area of 2.15 million km<sup>2</sup> covered by permafrost and is named as a third permafrost giant in the world, but it is relative later to systematically study the permafrost, especially the frozen soil mechanics. Since the 1950s, many studies have been carried out to investigate the characteristic of frozen soils for the economic and social development in permafrost regions. The achievements of the frozen soil mechanics in the stress-strain relationship, constitutive modeling, thermal-moisture process, frozen soil-structure interaction and test methods in China are reviewed, and the development trend for studies on the frozen soil mechanics study is predicted according to its subject characteristics, construction demand and the development trend of related subjects.

**Key words:** frozen soil mechanics; achievement; strength; hydration; constitutive modeling

## 0 引 言

冻土力学属于岩土力学的范畴, 但由于冻土中冰的存在, 使其力学性质与普通岩土类材料的力学性质相差很大。半个多世纪来, 伴随着国家对寒区交通、能源、通讯等设施的建设以及寒区经济的发展, 中国冻土力学研究从无到有, 逐步深化, 在广泛实践中实现了为寒区工程建设服务的价值。中国冻土力学研究与寒区科学事业相伴, 走过了近 60 a 的风雨历程。在此回顾冻土力学在中国的发展历史、发展现状, 传承厚重的历史成就, 在丰富的知识积累的基础上去认识自然, 去理解工程建设与基础研究的关系, 将为冻土力学的持续发展与创新提供借鉴与参考。

冻土是指温度在 0℃ 或 0℃ 以下, 并含有冰的各种岩石和土壤。在中国青藏高原、西北高山和东北北部的大、小兴安岭及松嫩平原等地区分布着大片的多年冻土, 而在贺兰山至哀牢山一线以西的广大地区, 以及此线以东, 秦岭—淮河线以北地区又是季节冻土的所在地。在这些地区, 地表层都存在一层冬冻夏融的

**基金项目:** 国家自然科学基金项目 (41071048); 国家自然科学基金创新群体项目 (41121061); 中国科学院知识创新工程重要方向性项目青年基金类项目 (KZCX2-YW-QN307); 国家重点基础研究发展计划 (973 项目) (2012CB026106); 冻土工程国家重点实验室课题项目 (SKLFSE-ZY-02-3); 中科院“百人计划”项目

**收稿日期:** 2011-01-25

冻结-融化层,作为地基的冻结-融化层,在其冻融过程中土体性质受气温的变化直接影响着上部建筑物的稳定与安全,因此,在冻土地区进行水利工程、工业与民用建筑及交通运输工程的建设,就必须对冻土及其与工程建筑物相互作用的一系列工程冻土学理论和实践问题做出解答,以确保冻土地基上工程建筑物的稳定性、耐久性 & 经济合理性。回顾近 50 a 以来中国冻土学的发展,它是紧紧围绕我国寒区工程建设中出现的冻土工程问题而展开的。

## 1 中国冻土力学发展的历史回顾

寒区资源、能源开发以及交通运输、工业与民用建筑的建设对冻土力学知识的需求,为冻土力学成为土力学研究领域的一个重要分支奠定了基础,同时冻土力学的发展也促进了寒区工程建设、经济发展。自 20 世纪 30 年代世界上第一部冻土力学专著《冻土力学基础》在前苏联问世以来,冻土力学作为一门学科已有 70 多年历史。在这 70 多年里,随着人们对冻土区地质环境的认识及其研究方法、技术手段的提高,冻土力学认识问题和解决问题的能力及其学科内涵进一步充实、提高。

冻土力学是应用科学,是为冻土区的工程建设服务的。回顾中国冻土力学的创立与发展,就是解决寒区工程建设所遇到的主要冻害问题的过程,它的发展与寒区岩土工程的发展态势密切相关,大体上经历了两个阶段。

### 1.1 创立与发展阶段(20 世纪 60 年代至 70 年代末)

中国对冻土力学的研究相对滞后于中国对冻土的认识,中国对冻土的认识始于解放后即 1949 年新中国成立以后,为满足东北及青藏高原冻土区矿藏调查、林业开发、铁路和公路建设以及工业与民用建筑等各项生产建设的需要,开展了冻土调查及资料收集工作<sup>[1]</sup>,此时,人们才开始关注冻土、认识冻土。也就是在这一时期,寒区工程建设过程中地基处理方法的选择使工程师们开始意识到,气温的变化对冻土力学性质的影响,使得冻土的强度与未冻土有很大差别,采用常规的地基处理方法来处理冻土区的地基是无法保证上层建筑的安全、稳定的。因此,60 年代初,铁路、公路、水利、建筑、科研、林业、煤炭等部门及有关高等院校,都先后成立了相应的冻土研究机构,开始对冻土区严重的道路翻浆和工业与民用建筑的冻害进行调查并开展室内冻胀试验研究。在这些冻土研究机构中,以 1966 年在兰州建成的冻土低温实验室最具代表性,由于这个实验室的成立,使得室内系统的研究冻土力学性质成为可能。在 70 年代,以兰州低温实验室

为基地,以青藏高原、大兴安岭与天山铁路,格尔木至拉萨输油管道、祁连山矿山、北方基本建设及冻结凿井等工程的需要为目的,较全面地开展了系统的科学考察、室内模拟与现场实体工程等试验研究工作。在此过程中,冻土学家一方面自主地把通过试验获得的冻土力学知识应用于寒区工程实践,另一方面引进并学习前苏联在冻土力学方面的知识,从理论和实践两方面开始探索寒区工程建设中的关键技术理论问题,这一时期是从感性认识上升到理性认识的过渡阶段,从对观测资料的收集过渡到规律的总结阶段。所以,把这一阶段称为中国冻土力学研究的创立与发展阶段。

### 1.2 全面发展壮大阶段(1978 年~至今)

20 世纪 70 年代末,中国经济、社会步入改革开放的发展时期,各行各业的协同发展,迎来广泛的学术交流与合作,中国人的学术成果开始走上国际讲坛,国外同行的学术思想也为寒区科学事业的发展提供支持。而计算机技术的发展与广泛应用又为科学技术的进步提供了强有力的工具,起到了巨大的推动作用。中国冻土力学研究就在这科学春天的阳光沐浴下茁壮成长。这一阶段的主要历史标志为:

#### (1) 冻土力学理论体系的建立

自 1978 年改革开放以后,中国冻土力学研究进入了百花齐放,百家争鸣的发展时期。以西部高山、青藏高原及东北多年冻土区经济发展的需要和两淮人工冻结凿井技术在矿井建设中的应用为目的,以中国科学院兰州冰川冻土所(现更名为寒区旱区环境与工程研究所)为基地,展开了普通冻土学、冻土物理力学和冻土工程学等全方位的系统研究,特别是冻土工程国家重点实验室于 1991 年在中国科学院兰州冰川冻土研究所建成并向国内外开放,为冻土学科的深入发展和人才培养提供了良好的实验条件,许多前沿性基础性课题研究,在该实验室取得长足发展,并取得了令世界瞩目的成绩,使中国冻土力学学科进入世界先进行列。通过不完全的检索,中国自 20 世纪 80 年代以来,已出版的冻土研究专著上百部,各种科学论文数千篇,这些著作和一大批重大工程的研究成果、工程报告全面展示了中国冻土力学研究的成就,形成了自己的理论体系,概括为:以冻土力学研究为基础,以工程冻土问题分析为核心,以工程应用为目的,以科学试验研究为手段。以老一辈冻土学家周幼吾、吴紫汪、程国栋、陈肖柏、朱元林、徐学祖、童伯良、童长江等为代表的专家,在艰苦的条件下,做试验、搞研究,为这一理论体系的建立做出了奠基性的贡献。基本理论体系的建立,使认识到对冻土宏观力学性质的研究必须引申到对冻土中水热迁移和成冰规律的

微、细观研究上, 引申到冻土相变过程发生的热传导特征、土壤热物理性质和水分输运参数与温度和相成分的关系上, 从而研究人员借助先进的电镜扫描技术、CT 扫描技术和压汞仪等仪器, 开展了土、水、热、力和溶质 5 大要素对土中水成冰过程和冷生组构形成规律的影响研究。

### (2) 研究成果走向世界, 并赶超国际水平

自 1978 年中国学者应邀参加第三届国际冻土大会以来, 中国冻土学家先后组团参加了七届国际冻土大会, 两次国际地层冻结与土冻结作用会议, 并成功主办了第六届国际冻土大会、国际多年冻土工程会议以及亚洲冻土会议。通过参加与主办国际会议, 使中国在冻土研究领域的科研成果走向世界, 并在与国际同行交流的过程中, 得到提升和发展, 逐渐与国际研究水平接轨, 并成为国际冻土研究的领跑者。在近几届国际冻土大会的学术论文中, 中国学者的论文名列前茅, 程国栋院士当选第五届国际冻土协会副主席(1988~1993)、第六届国际冻土学会主席(1993~1998), 朱元林当选为第六届、第七届国际冻土学会执委, 马巍等当选为第七届国际冻土学会中国理事、第八届、第九届国际冻土学会执委等即是有力的说明。中国在冻土力学研究方面的建树不仅为中国寒区工程建设提供了有效的理论指导, 而且带着自己的特色走向世界, 使中国冻土力学研究的发展在国际上具有举足轻重的地位。

### (3) 在实践中开拓了新的生长点

进入 20 世纪 80 年代后期, 随着生产力的发展和科技进步以及社会需求的不断增长, 浅表资源的贫化逐渐使中国的工程建设转向地下, 如地下电站、地下铁道的建设, 越江、越海隧道、地下市政的建设以及向深部要资源的矿山工程等。当这些工程遇到软土、不稳含水土层、流砂、高水压等复杂的工程地质和水文地质条件时, 人工冻结法将成为行之有效的技术之一。但由于人工冻结法形成的冻土与天然冻土在冻结方式、受荷历史、承载结构和应力路径等方面的不同, 无法将现有的对天然冻土力学的研究成果应用到人工冻结工程中, 从而产生了一个新的学科生长点——深部人工冻土力学。

## 2 中国冻土力学研究的成就

面对冻土这样一个极其复杂的研究对象, 理论的发展是很艰难的。但经过学者们的不懈努力, 冻土力学还是取得了很大的成就并不断前进。它的发展经历了以试验为基础研究冻土在特定条件下的主要特点, 并确定各物理量间的函数关系及模型中参数值的试验

冻土力学研究阶段; 经历了以连续介质力学的基本理论为基础, 结合弹性、塑性、黏性理论来建立冻土本构模型的唯象本构模型研究阶段; 进入到现在的以充分考虑冻土材料的细观组构及其水热过程的细观本构模型研究阶段。在每一阶段的研究过程中, 始终坚持工程实践是检验冻土力学理论正确与否的唯一标准, 也是冻土力学理论发展的源泉和动力。下面我们主要从冻土的强度与变形、冻土的本构模型研究、冻土的水热过程研究、冻土与结构物相互作用研究及冻土力学测试技术的发展等 5 个方面总结中国在冻土力学研究方面所取得的成就。

### 2.1 冻土的强度与变形

中国比较系统地进行冻土强度蠕变研究起始于 20 世纪 70 年代, 最初是为解决青藏铁路建设中的冻土问题。其冻土强度与蠕变研究也是沿袭前苏联的研究方法, 通过大量室内外试验取得了许多成果, 给出了工程设计的应用参数。第一届、第二届全国冻土学术会议论文集<sup>[2-3]</sup>、青藏冻土研究论文集<sup>[4]</sup>以及中国地理学会冰川冻土学术论文集<sup>[5]</sup>等是这一阶段主要工作的反映。自 20 世纪 80 年代以后, 随着两淮人工冻结凿井工程的施工, 以及青藏公路的上马, 使中国冻土强度与蠕变有了长足发展, 最有代表的论著有《冻结凿井冻土壁的工程性质》、《冻土路基工程》<sup>[6-7]</sup>。20 世纪 90 年代初冻土工程国家重点实验室建立以来, 我国冻土强度蠕变研究迈上了新的台阶, 冻土静力学研究、冻土动力学研究、引用相邻学科的理论和研究方法进行冻土力学研究, 特别是微观机理试验研究等方面取得了一定的进展和可喜的成果, 丰富和发展了冻土力学的研究内容, 使中国冻土强度和蠕变研究处于国际领先地位<sup>[8-9]</sup>。尤其是近 10 多年来, 由于西部寒区工程建设、东部矿井的开挖以及地铁隧道建设的需要, 各大科研院所、高校等对冻土的力学性质根据各自的需要, 就常规冻土与深部人工冻土的强度与变形, 运用不同的研究方法进行了大量的研究。

在常规冻土基本力学性质的研究方面, 吴紫汪等提出了用现场载板试验、塑性流动方程及应力-应变曲线等确定冻土长期强度的方法, 并讨论分析了单轴恒应变状态下, 冻结黄土的松弛规律及影响因素, 给出确定流变体黏质系数的新方法, 研究围压和温度对冻结兰州砂土塑性及应变硬化性能的作用, 并通过观测分析冻土单轴及三轴蠕变过程中细观结构的变化情况, 提出蠕变过程中结构缺陷的增生与扩展制约着土结构的强化与弱化作用, 控制着蠕变变形形态特征<sup>[10-17]</sup>。朱元林通过对冻结粉土和砂土单轴试验数据的分析, 分别给出了描述粉土和砂土单轴极限抗压强度随应变率和温度变化的数学模型, 研究了温度、含水率和变

形速度对冻土的抗拉强度的影响,并将速率过程理论用于研究冻土的蠕变特性,提出了冻结粉土的速率过程理论方程<sup>[18-22]</sup>。马巍等通过对冻结砂土进行三轴蠕变试验,证明了冻土在蠕变过程中体积变化不为零的事实,并用试验数据分析了剪应力强度与冻土的体积变化的关系<sup>[23-25]</sup>。通过对冻土单轴抗压强度试验数据的分析,令峰等学者认为,伴随应力-应变增加的不可逆破坏,冻土应力-应变曲线的细观结构也呈现为阶梯形曲线,从而将 Mandelbrot 的分形几何理论引入冻土力学研究,利用分形几何中的线性双曲迭代函数系统理论(LHIFS),得到了用 LHIFS 生成的线性形插函数(LFIF)(即 LHIFS 的吸引子)逼近冻土应力-应变曲线的方法,并给出了计算应力-应变曲线分形维数的方法<sup>[26]</sup>。屈服面是塑性本构理论中的重要方面,如何建立屈服面理论及具体构造屈服面历来都是塑性力学的重要研究内容,由于冻土是弹塑性体,所以屈服面的研究在冻土的力学和本构研究中也不例外。继马巍等给出冻土的抛物线型屈服准则以后,朱志武等基于广义塑性力学,通过对已有屈服函数 Matsuoka-Nakai 屈服准则的修改,提出了一个冻土屈服函数,并对此函数进行了具体研究<sup>[27-28]</sup>。何平等从非饱和和冻土强度与饱和冻土强度的联系出发,分析非饱和和冻土强度的形成机理,提出合理且较为方便的非饱和和冻土强度的计算关系式<sup>[29]</sup>。

目前,在冻土动力学研究方面,中国也取得了很大的进展。朱元林等通过对冻结粉土(兰州黄土)在不同围压下进行轴向振动三轴蠕变试验,提出了冻土在振动荷载作用下的三轴蠕变模型,并对模型中各参数的物理意义及变化规律进行了讨论<sup>[8-9]</sup>。徐学燕等在大量低温动三轴试验基础上给出冻土的应力-应变关系、参数和动弹模量的确定方法,在国内首次得到冻土动泊松比的数值,并给出冻土的动弹模量、动泊松比、动剪切模量、动阻尼比的数值及它们与冻土温度、振动频率的关系<sup>[30-31]</sup>。凌贤长等基于对冻结哈尔滨粉质黏土动三轴试验前后试件 CT 检测结果,详细研究了冻土的动强度、微观变形机制和结构损伤等变化特性及其与试验的负温和围压、土的含水率和重度、轴向荷载的振动频率和振动次数等主要影响因素之间的关系。并利用以上数据定量分析了冻土的密度、结构及损伤度等方面的变化及动三轴试验前、后 CT 数增量、方差增量与围压、负温之间的关系,分析了在振动荷载作用下冻土内部孔隙、裂隙扩展过程,从附加损伤的角度证实了临界围压值的存在,明确了冻结粉质黏土结构弱化的根本原因是孔隙冰的压融和微裂隙的发育<sup>[32]</sup>。基于冻土的阻尼比是分析冻土区建筑物动力反应的必不可少的计算参数,徐春华在大量低温动

三轴试验资料基础上,对冻土的动应力-应变关系试验成果进行了分析,给出试验温度、围压、土的含水率、轴向动荷载的振动频率和振动次数等对冻土的阻尼比的影响关系,得出了冻土温度、围压、频率是影响冻结粉质黏土动阻尼比的主要因素<sup>[33]</sup>。赵淑萍等还就振动频率、振动幅值等因素对冻土的动蠕变特性进行研究,这些研究为进一步深入开展冻土场地动力特性研究提供了基础的试验资料与研究结果<sup>[34]</sup>。最近,基于寒区工程稳定性现场监测研究所面临的诸多问题,如影响因素多、条件复杂、现场条件恶劣、研究费用高以及周期长等,冻土工程国家重点实验室利用模型试验的优势,开发研制成功了“寒区工程动荷载模型试验系统”,利用这一研究平台,可对动荷载作用下的寒区工程的应力场、温度场变化进行模拟研究,并进行变形监测及稳定性分析,对于解决我国寒区重大工程建设中的动荷载响应问题,保持我国冻土动力学的国际领先地位都具有积极意义。

为了研究冻土在荷载作用下从发生微小裂纹开始到产生宏观裂纹直至破坏的整个过程,损伤力学被引入冻土研究中,苗天德等基于冻土和多晶冰的系列蠕变试验,应用“复形-电镜”方法对冻土微结构进行观测,在总结前人有关研究成果的基础上,认为冻土中冰的胶结黏聚力,在荷载作用下矿物颗粒的重新定向以及微裂纹的萌生和扩展控制着冻土的整个破坏过程<sup>[35]</sup>。由此在理论上借助于当代损伤力学处理问题的框架,引入冻土蠕变的耗散势,并将其构造为含冰量、颗粒定向因子以及面积损伤因子等表征微结构变化的内变量的函数,建立了冻土蠕变的三维损伤演化方程,给出了单轴蠕变过程各阶段过渡的判据。这一结果从理论上描述了冻土蠕变过程的“强化”和“弱化”现象。刘增利等基于冻土单轴压缩的 CT 动态测试,提出冻土单轴压缩下的损伤由完全不同的两个阶段组成:其一是塑性硬化下的塑性损伤,其二是由于新产生的裂隙造成的微裂纹损伤,并对两种不同损伤阶段下冻土微结构变化特征进行了讨论,给出了各阶段损伤量计算公式<sup>[36]</sup>。李洪升等认为冻土破坏的过程是微裂纹损伤与临界串接的演化过程,确认了冻土微裂纹损伤区的存在,并分别用莫尔准则和最大拉应力准则建立了微裂纹损伤区计算模式。冻土是典型的多相复合材料,除了土体颗粒、冰晶体、未冻水之外,还存在有大量的低密度区和孔隙,这一点使得用冻土断裂力学方法研究冻土的强度特性成为可能<sup>[37]</sup>。从 1995 年开始,李洪升等开始进行冻土断裂力学方面的研究,通过对冻土断裂韧度测试理论和方法的探讨,进行冻土断裂韧度的测试和裂纹开裂过程区特性的微观研究,以期建立一个以断裂韧度为参量的广义强度破坏理论<sup>[38-41]</sup>。

近来, 由于青藏铁路工程建设中有不少路段穿越高温高含冰量冻土区, 在这一多年冻土地区, 冻土中的含冰量常常高于相应的饱和土冻结后的含冰量, 从而使其在较高的负温状态下表现出不同于我们通常所研究冻土的力学特性。正是这一特殊性, 影响着铁路沿线建筑物的设计施工和铁路的安全运营, 因此, 对高温高含冰量冻土力学性质的研究是目前冻土学家关注的重点。从现场旁压试验到室内试验研究, 从对高温高含冰量冻土静强度的测试到动强度以及残余强度的研究。通过这大量的研究, 回答了含水率的变化如何影响高温高含冰量冻土蠕变强度的问题, 给出了高温-高含冰量冻结黏土单轴压缩蠕变方程、应力-应变关系和长期强度方程<sup>[42]</sup>; 获得了冻结砂土的强度屈服准则<sup>[43]</sup>; 并利用大量的单轴试验数据, 对高温冻土的弹性模量及强度概率分布进行统计分析, 给出高温高含冰量冻土的强度和弹性模量的概率分布规律<sup>[44]</sup>。

随着人工冻结技术在深厚松散土层矿井建设中的广泛应用及凿井深度的不断加深, 工程病害事故接连出现, 许多专家学者逐步认识到, 传统的浅层(或表层)冻土力学理论和参数已不适用于深层冻土结构稳定性评价, 因此, 深部冻土力学研究应运而生。崔广心教授通过分析深部冻土与浅部冻土的成因以及在工程中的作用, 从冻结方式、受力历史、承载结构、应力路径等 4 个方面详细论述了它们之间的区别与联系, 从而肯定了将浅部冻土力学的成果外延应用到深部冻土时, 造成计算结果或设计结果错误是必然的, 并给出了深部冻土力学研究的基本框架<sup>[45-46]</sup>。随后, 马巍等为了探索深部冻土力学较为理想的室内试验方法, 通过对  $K_0$  排水固结试样、等压排水固结试样、等压不排水固结试样和先冻结后固结试样进行三轴试验, 提出  $K_0$  排水固结试验方式是适合于研究深部冻土力学性质的、最为理想的室内试验模式。根据这一试验方法, 就增加轴压和卸除围压两种不同应力路径对深部冻土的破坏强度和破坏应变进行比较, 进一步用理论证明了按增压试验的强度指标进行冻结壁稳定性设计时, 随着开挖深度的增大, 导致冻结壁坍塌和冻结管的断裂的原因。任何事物都不是独立存在的, 它们之间既有区别又有联系, 深部冻土与浅部冻土也一样, 他们之间即存在差别, 肯定也存在联系<sup>[47-49]</sup>。为了找出深部冻土力学与浅部冻土力学之间的联系, 马巍等将深部冻土力学试验模式下所得到的冻土的力学性质与常规冻土力学实验方法下所得到的结果进行比较, 在两者的强度和两者变形之间建立了一种函数关系, 这就为将现有的一些研究成果直接应用于深部冻土力学研究中打下了基础<sup>[50]</sup>。同时, 王大雁等根据前人提出的实验方法, 就深部人工冻土的应力-变关系,

深部人工冻土实际的弹性变形范围以及深部人工冻土的初始刚度和强度特征等做了详细的试验研究, 这些研究不仅完善和发展了深部冻土力学理论, 而且丰富和充实了现有的冻土力学理论<sup>[51-54]</sup>。

## 2.2 冻土的本构关系研究

所谓本构关系是指自然界的作用与由该作用产生的效应两者之间的关系。冻土作为一种特殊的岩土类材料, 由于土中冰包裹体和未冻的黏滞水膜的存在, 使得构建冻土材料的本构模型成为一项相当困难的工作, 尽管如此, 许多学者还是在这方面进行了大胆的探索。

早期对于冻土本构模型的研究, 都是基于连续介质的假设, 从分析冻土受力后的表现性状入手, 利用试验得出的应力-应变关系, 应用曲线拟合或弹性理论, 塑性理论及其它理论来建立本构模型, 这种模型将颗粒材料的力学特性用状态参数(孔隙比, 温度, 相对密度及各向异性张量等)来描述, 忽略颗粒之间接触特性的所有细节, 可以较容易的应用数学分析工具。在这一研究阶段朱元林等提出的冻土单轴压缩本构关系类型图以及冻土的动三轴蠕变模型最具代表性<sup>[8,55]</sup>, 另外还有蔡中民等提出的适用于静荷或重复加载的能够反映温度效应的黏弹塑本构模型<sup>[56]</sup>。但由于冻土中冰的存在, 对冻土受力的分析, 不仅要考虑冻土受力后的宏观表现, 更要关注发生在其内部的变化以及由此引起的相变过程, 所以说, 对于冻土本构关系的研究, 进展很慢。直到 1995 年, 苗天德等采用复膜-电镜方法开展冻土蠕变损伤的研究, 将损伤力学理论引入冻土力学的研究中, 为冻土本构模型的研究开辟了一条新途径。在随后的十几年里, 基于损伤力学理论从细观角度解释冻土强度与破坏特征, 成为冻土本构模型研究的有效工具<sup>[57]</sup>。何平依据连续介质力学和热力学原理, 建立了冻土黏弹塑损伤耦合本构理论, 并在理论分析及试验验证的基础上, 提出损伤演变律及损伤门槛值的具体形式, 同时分析了围压对冻土的强化及弱化机理, 建立了与球应力相关的未冻水含量状态方程以及黏塑性耗散势函数<sup>[58]</sup>。宁建国尝试用复合材料细观力学的方法建立土、冰、水的弹性常数与整个冻土体的弹性常数之间的直接关系, 利用研究复合材料有效性能的细观力学方法中的混合律理论去考察冻土材料的弹性常数与其组分相的弹性常数之间的关系, 并进一步将损伤力学理论应用于冻土力学中, 研究冻土材料的损伤演化规律, 建立考虑损伤影响的冻土本构关系。笔者认为, 这项研究将冻土材料内部组成的力学行为与宏观的冻土力学行为结合进行研究, 在宏观和细观之间建立了联系, 在研究方法上为深化冻土力学的研究提出了一种新的分析思

路<sup>[59]</sup>。刘增利采用连续介质力学与热力学方法,建立了含损伤的冻土单轴压缩损伤本构模型,并以冻结兰州黄土单轴压缩 CT 试验获得的冻土损伤作为基础,建立了冻土损伤与应变之间的关系,为进一步研究冻土的复杂受力提供了基础<sup>[60]</sup>。

### 2.3 冻土的水热过程研究

冻土的水热过程研究就是研究冻土中土骨架、冰晶体、未冻水与空气这 4 项物质在温度、土水势、压力与变形等外界因素作用下相互运动、迁移、扩散与相变的过程,简单的说就是研究土冻结与融化过程的科学。冻土因水和冰的并存,温度状态的变化即引起水-冰相变或者冰-水相变作用,由此产生一系列的热学、力学、流体力学和物理化学的变化,我们把所有这些变化都归因于冻土水热过程的变化。下面我们就冻土中未冻水含量、冻土中水分迁移、土中水冻结时的成冰作用以及水热力耦合 4 个方面来总结中国在冻土水热过程研究中所取得的成就。

#### (1) 冻土中的未冻水含量

冻土中的未冻水是指当土冻结后,由于颗粒表面能的作用,没有被冻结的那部分液态水,这部分水与冰之间始终保持着动态平衡,即温度降低未冻水含量减少,部分未冻水将以冰的形式出现。反之,若冻土温度升高,则未冻水含量增大,部分冰将向未冻水转化。

冻土中的未冻水含量主要取决于 3 大因素:土质(包括土颗粒的矿物化学成分、分散度、含水率、密度、水溶液的成分和浓度)、外界条件(包括温度和压力)以及冻融历史。当温度相同时,未冻水含量随土颗粒变细即土颗粒的比表面积增大而增大,即黏土>粉土>砂土。而冻土中未冻水含量与温度的关系模式是未冻水众多影响因素中的基本模式,初始含水率、含盐量和外载对未冻水含量的影响均可归结为冰点降低效应且具叠加性。由于未冻水含量不仅是评价冻土中水分迁移特性的重要指标,而且也是土热工计算中常用参数,可测定冻土中未冻水含量的仪器即昂贵,操作起来又费时,为解决这个问题,徐学祖利用两个不同的初始含水率及其对应的冻结温度建立了预报给定土未冻水含量的基本模式<sup>[61]</sup>。又利用基本模式,根据冰点降低的叠加性,建立了可预报未冻水含量随初始含水率、初始浓度和外载变化的综合模式<sup>[62]</sup>。并给出了土水势与含水率、未冻水含量与温度以及冻土中土水势与温度之间的关系表达式<sup>[63]</sup>。

张立新就盐的类型和浓度对未冻水含量的影响进行了详细研究发现,含 NaCl 盐土中溶液随温度降低有两次相变,在第一次相变中未冻水含量与温度间的关系符合指数衰减规律的基本模式,且随初始含水率

与初始浓度增大而增大,在第二次相变中,未冻水含量出现一个新的突变点。但就硫酸盐土来说,初始含水率和初始浓度对未冻水含量的影响不大,通过杠杆原理对含氯化钠盐冻土中未冻水含量曲线上二次相变进行分析认为,这是由于电解质的介入使未冻水和温度经验关系方程中系数发生变化所致<sup>[64]</sup>。结合核磁共振仪,利用自行设计的机械加压装置,确定了冻土对应不同压力和温度的未冻水含量,并计算了相应压力下冻土的冻结温度。结果表明,冻结温度随压力增大而呈线性降低;对应不同温度的未冻水含量随压力的增大而增大。

冻融过程中测得的未冻水含量结果表明,冻结过程的未冻水含量始终大于融化过程测得的值,即冻结过程与融化过程相比,融化过程的未冻水含量存在滞后现象。而它们之间的差值随负温度降低而减小<sup>[65-66]</sup>。程国栋通过分析季节冻土区未冻水含量与温度之间的非线性关系提出了季节冻结和融化层的冻结部份中未冻水的单向积聚效应的概念,这一研究为解释多年冻土层上部厚层地下冰的形成提供了理论依据<sup>[67]</sup>。

#### (2) 冻土中的水分迁移

冻土中的水分迁移改变了冻土原来的结构构造和冰-水比例。这种在空间位置上不等量的冰-水-土骨架的重分配,改变了冻土的物理力学性质。水分迁移作用是导致冰分凝和冻胀的根源。徐学祖等进行大量试验,研究了正冻土、已冻土和正融土中的水分迁移现象。试验证明,处于封闭系统的正冻的非饱和中细砂土,在端面温度恒定条件下,水分向冻结锋面迁移,而且随初始含水率的增大,迁移通量减少<sup>[68]</sup>。开放系统饱水正冻土在端面温度的恒定条件下,入流量与时间平方根成正比<sup>[69]</sup>,并给出了封闭系统已冻土中的水分迁移通量与冻结历时、温度和温度梯度的关系式<sup>[70]</sup>。

进行封闭系统中非饱和含盐正冻土中的离子迁移试验表明:在饱和度低于 0.5~0.6 的情况下,土中水分以汽态水迁移为主,粒子也将随水汽一起发生迁移,但迁移量很小。当饱和度大于 0.6 时,土中水则以液态迁移为主,离子随液态水一起迁移时,其迁移量明显增大。无论是汽态水还是液态水迁移为主,粒子和水分的迁移量均与干密度有关,但并非线性关系,其中存在一个最佳密度,在此干密度下,粒子和水分迁移量最大<sup>[71]</sup>。开放系统饱和含盐正冻土中的盐分迁移试验揭示出,在开放系统饱水土单向冻结过程中,含水率和含盐量的增量是初始含水率、初始密度、干密度和补给溶液浓度、顶面温度和冷却速度的函数。

盛煜将分凝势的概念引深到一般的正冻过程中,提出了迁移势的概念,结合 Harlan 模型提出了计算整

个正冻土中水分场的数学模型,并介绍了确定迁移势的试验方法<sup>[72]</sup>。

徐学祖等通过边界温度恒定的岩盘冻胀试验,提出冻结缘的厚度取决于冻结速度和冻胀速度两个变量且具有随冻结历时增大、恒定和减小的3种模式。冰分凝最容易在无结构联系处(裂隙)形成,冰分凝温度随冷端面温度降低而降低,并提出利用未冻水含量与温度关系曲线及土的起始冻结温度和冷端面温度估算冰分凝温度的方法<sup>[73]</sup>。

在人工冻结工程中,由于土体在冻结过程中所产生的冻胀往往破坏地下管线和地面建筑物,恶化环境,而且伴随冻胀一般均有可观的融化下沉,冻胀对环境的不利影响使得该方法的工程应用受到限制,如何克服冻结过程中由于水分迁移而产生过大的冻胀量成为制约这一技术广泛使用的瓶颈,周国庆等通过对冻结细粒土的数值分析,指出与连续冻结相比,间歇冻结在冻结锋面推进速度、冻结区温度、平均冷率和未冻结区的温度梯度等方面有显著不同,这些差异的存在有利于抑制冻胀的产生和发展,从而阐述了用间歇冻结法控制人工冻土冻胀的机理<sup>[74-75]</sup>。

### (3) 土中水冻结时的成冰作用

土中水冻结成冰作用取决于内应力和外应力共同作用的强度和速度。外力通常由温度和荷载诱导或施加,内应力通常由温度和土中水溶液的相变诱导。因此冻土中冷生构造形成的基本影响因素应该由土、水、温、盐和力(外载)5大要素,其中温度是前提,水分是核心。边界温度通过控制土体的冻结速度、温度梯度、水分迁移方向、速度和迁移量,来影响土中水的相变速度、成冰位置和数量,压力的大小和方向影响成冰程度<sup>[76-78]</sup>。

水分迁移后冻结成冰可分别以汽-固、液-固和固-汽-固、固-液-固4种方式进行,但以液-固成冰方式为主。就液-固成冰方式,现已提出4种成冰机制:分凝成冰、胶结分凝成冰、重复分凝成冰和侵入成冰机制,其中,重复分凝成冰机制是中国学者程国栋院士于1982年提出用于解释多年冻土上限处厚层地下冰成因的学说<sup>[79]</sup>,其基本要点是:在温度梯度作用下,冻土中未冻水总是向温度低的方向迁移。冷季活动层中出现正地温梯度时,未冻水向上迁移,但因此时地面温度很低,未冻水在非剧烈相变区的封闭系统中迁移,迁移量小。暖季活动层中出现负地温梯度时,未冻水向下迁移,迁移量大。由未冻水的不等量迁移,经重复分凝,使多年冻土上限处地下冰逐年加积。同时,在温度梯度作用下,嵌入冰中的土颗粒,将穿过冰体朝温度高的方向运动,这种冰的自净作用年复一年循环使土颗粒向上移动,从而使含土冰

层净化。

光学显微镜、扫描电子显微镜、CT扫描仪和压汞仪等的使用,可帮助人们较系统的研究土、水、温、盐和力5大要素对土中水成冰过程和冷生构造形成的影响。李萍曾采用受控冻结试验后所得的冷生构造复制膜,进行了计算机图像数字化处理,将受控冻结后所得的冷生构造的最终结果,反演为冻结试验过程中冻结锋面、冰分凝锋面、冻结缘厚度随时间变化的动态方程<sup>[80]</sup>。

### (4) 冻土水热力耦合模型研究

土体冻结过程中或冻土融化过程中,温度、水分、应力三场的相互作用是一个及其复杂的热力学、物理化学和力学的综合问题。因水-冰相变或冰-水相变以及水分迁移聚冰现象的存在,成为冻土介质本身所特有的力学问题,即所谓的水热力耦合问题。冻土温度场的变化会引起水分迁移和应力状态的改变,反过来,应力场的变化又引起温度场和水分场的重分布,这3场相互制约的关系存在于整个冻融的全过程。所以,对冻土水热过程研究的最终目的就是建立能真实反映冻土冻融过程的冻土水热力耦合数学模型。

冻土水热运移的宏观表现形式是土体的冻胀融沉。基于寒区工程所面对的冻胀融沉问题,对冻土的水热过程研究已有近60a的历史,但是这些研究几乎只局限于应力场、水分场以及应力-应变关系等单一的场作用和单一因素。只有近20a来,随着人们认识的提高、计算机的广泛应用以及理论研究的深入,将单一场和影响因素的研究发展到水、热、力3方面的综合统一研究,这无疑是一种认识上的提高和飞跃。首先Shen Mu等在Harlan流体动力学模型的基础上,把迁移的水分量简单等效成一附加变形而作用在应力场上,从而建立起准三场耦合模型<sup>[81]</sup>;张立新等基于前人对冻结过程中热质迁移影响因素的分析,应用计算机断层扫描仪,在非损伤情况下,通过对试验中的正冻土样品每隔一定时间进行断面扫描,结合实测试验前后水分场的变化特征,分析了封闭系统正冻土在温度梯度作用下水分场和密度场的动态耦合过程,以此来研究土中热质迁移并引起冻胀发育的内在过程<sup>[82]</sup>。何平等依据连续介质力学、热力学原理,提出了土体冻结过程中的三场耦合方程<sup>[83]</sup>,并对土体冻结过程中的体积变化、水分迁移和分凝冰的成因等问题进行了分析。王铁行等基于冻土路基特殊的工程性质,就水分迁移结果对温度场的影响特别是对热物理参数的影响进行了研究,提出了冻土路基水热耦合计算模型,并给出了水热耦合计算的总体流程图,从而揭示了冻土路基温度场和含水状态的横向差异<sup>[84]</sup>。李洪升等基于季节冻土的水分场、温度场和外荷载的相互关

系,提出了考虑水分迁移、热质扩散和外荷载相互作用的冻胀预报模式<sup>[85]</sup>,并将冻土体视为空间弹性体,提出了土体在冻结过程中水分场、温度场、应力场三场耦合的一般数学模型,给出了相应的离散方程及其解法<sup>[86]</sup>。苗天德等在连续统力学的混合物理论框架下研究了冻土的力学-热学性质,建立了相应的本构关系。推导出控制冻土水热迁移过程的场方程,这一发现为研究土体冻结过程中的非线性效应提供了理论基础<sup>[87]</sup>。陈飞熊等利用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,推导出冻土体(考虑土骨架与冰颗粒之间相互作用力——冻胀力)的有效应力原理、正冻土单元的连续性方程及各相成分的能量转换与传递方程,在此基础上提出了正冻土的控制微分方程的理论框架,从而建立了以多孔固液介质的质量守恒方程和多孔多相介质的热、能守恒方程为基础的全面考虑冻土中土骨架、冰、水三相介质的水、热、力与变形耦合作用的数理方程,这一研究比当前国际流行的正冻土流体动力学模型、刚冰模型和热力学模型更能全面描述正冻土的水、热、力与变形之间的实际状态<sup>[88]</sup>。后来,陈飞熊等又在“饱和正冻土的理论构架”的基础上,假定冻土体内空气的流动是一种 Darcy 流,考虑了非饱和土中气相的影响,提出了一种综合考虑气体与外界完全相通和气体与外界完全不相通两种极端情况的水、热、力相耦合多孔多相介质理论构架,即半连通、半封闭非饱和正冻土理论构架,讨论了较简单的半连通半封闭的非饱和孔隙冻土体三场耦合模型<sup>[89]</sup>。李宁等基于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、冰之间的相变机制,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,开发了相应的冻土三场耦合数值分析软件 CDST,并对 214 国道花石峡试验路基实测的地温变化和路基路面变形进行了对比分析验证<sup>[90]</sup>。

虽然目前对冻土水热过程的研究还在探索阶段,所得的结论还是零散的、不系统的,对冻融过程的认识也还仅仅是局部的或者是唯象的,但是这些研究成果为冻害预报和防冻害措施的选择发挥了重要作用。

#### 2.4 冻土与结构物相互作用研究

寒区工程中冻土与结构之间的相互作用主要表现在地面上部结构与作为建筑物地基的冻土体之间的相互作用、地下结构与周围土体的相互作用以及挡土墙与墙后土体的相互作用 3 个方面。而对冻土与结构之间相互作用问题研究的核心就是研究土体在冻融过程中,由于土体水分迁移而产生的冻胀力分布、大小及其对建筑物的影响。所以,冻胀力是这一问题研究的

核心,而土体本身的性质是决定冻胀力大小的主要因素,因此,早在 20 世纪 80 年代初,吴紫汪就在考虑冻土与建筑物基础之间的相互联系,并综合分析冻土的内在规律的基础上,按冻土工程性质的好坏,将冻土人为地分成若干个等级,然后讨论了各类土的物理意义及其与决定冻土工程性质的主要指标——融沉、冻胀和强度等的内在联系,阐述各种冻土分类的统一性,提出综合冻土工程分类表,这一研究是寒区工程地质勘测和设计工作的基础<sup>[91-92]</sup>,为后来的寒区水利、道路、隧道以及工民建等工程建设提供了重要的理论指导,同时也为制定寒区建筑物病害防治措施提供了理论依据。随后,丁德文、黄小铭、陈肖柏、徐绍新、刘鸿绪、丁靖康、朱强、陈卓怀、励国良等就寒区水利、道路工程中所遇到的冻胀、融沉问题从理论上进行了深入探讨,他们研究了土冻胀所产生的切向、法向和水平冻胀力的机理,提出了冻胀反力的分布规律,并利用冻胀反力来锚固基础的冻拔;分析了水、土、温、压与基础形式面积大小、砌置深度对法向冻胀力的影响,提出了法向冻胀力的经验公式;分析了挡土墙背冻胀应力的分布,给出了高、低挡土墙背水平冻胀力的分布图形;并根据建筑物的不同类型,提出应分别对桩、板、墙采取不同的抗冻技术措施;深入研究了桩基础与冻土之间的热平衡关系、垂直与水平承载力、设计计算方法、参数选择和适用范围,并取得了实用性的进展;探讨了浸湿水源与路基土体的水热变化特征,通过路堤、路堑表面热量发布规律与上限计算方法、边坡土体冻融界面抗剪强度变化规律、土冻结过程水平与切向冻胀力分布与变化规律等方面的试验研究成果,尤其是通过路基二维、三维物理模型的建立和实测解剖、模型试验、数理分析等多种方法的运用,深化了对路基在冻融条件下水热运动规律与变形特征的认识,提出了多年冻土地区路堤临界高度的确定方法,路堑保温层厚度的设计计算方法,地下冰地段路堑断面形式等多项成果;探讨了多年冻土地区桥梁、涵洞基础人为上限形态与变化规律,为确定桥涵基础类型和埋置深度提供了理论依据;通过调查和试验研究,从土质因素、水文因素、气候因素、地质地理条件、设计标准,施工与养护运营条件等环节,探讨了季节冻土区路、桥冻害机制和聚冰原理,提出了以土质、水源及其聚积特征为判别标准的冻害分类;在渠道衬砌抗冻研究方面,各地区根据土冻结的不同条件,在野外实地观测了渠道各部位的冻胀特点,深入分析了渠道衬砌冻害的机理,因地制宜地提出了工省效宏的抗冻害技术措施<sup>[93-104]</sup>。上述研究成果主要反映在《冻土地区建筑地基基础设计规范》、《水工建筑物抗冰冻设计规范》以及《岩土工



程勘察设计手册》等规范中,成为中国寒区工程设计施工的指导理论。

近年来,随着寒区隧道建设的发展,冻融作用常造成隧道的开裂和剥落,导致隧道出现漏水、结冰、挂冰等冻害,因此冻结围岩与隧道衬砌之间的冻胀力成为寒区隧道建设的热点问题,何春雄、赖远明、张学富等学者在这方面做了大量的工作,他们通过对严寒地区隧道现场基本气象条件的分析,建立了隧道内空气与围岩对流换热及固体导热的综合模型;根据传热学和渗流理论,导出了温度场和渗流场耦合问题的控制微分方程,应用摄动技术,研究了具有接近零度初始温度的圆形隧道的冻结规律,给出了这一问题的近似解析解;应用 Mises 屈服准则和冻土的工程蠕变理论,导出了冻土黏塑性本构关系,提出了冻土工程地震的计算方法;根据流体力学、冻土学和传热学的基本理论,建立了寒区隧道空气与围岩对流换热和围岩热传导耦合问题的三维计算模型<sup>[105-107]</sup>,这些研究为寒区隧道设计计算理论和规范的建立做出了贡献。

## 2.5 冻土力学测试技术的发展

冻土力学试验是了解冻土物理力学性质的重要手段,经过几十年的发展,中国的冻土力学测试和试验水平已有很大的提高。在冻土物理参数的测试方面,利用先进的脉冲核磁共振技术实现了对冻土中关键物理参数未冻水含量的室内测定,而时域反射仪(TDR)在野外环境下的广泛使用,对掌握多年冻土区或季节冻土区冻土中水分的变化提供了简洁的方法。冻土测试手段的改进不仅来自于科学技术的发展,而且是基于对冻土现象的认识和理解,通过对冻土形成过程中温度变化的分析研究,获得了测定冻土冻结温度及冻土基本热参数的简便方法。冻融过程试验系统已突破了单一的固定边界控温,发展到随机模拟外界温度变化控温,更符合寒区冬冻夏融实际过程的模拟和工程应用。在冻土力学参数的测定方面,通过对 MTS-810 材料试验机的改造,使它不仅具备了进行冻土试验所必备的负温控制功能,而且在控温精度、测试精度和操作过程方面都优于国外同类设备,为开展冻、融土及软岩在动、静荷载作用下弹性模量、蠕变特征、破坏强度及本构关系的研究提供了技术保证。随着电子显微镜及计算机图像处理系统的发展,中国在研究冻土宏观力学性质的同时,将电子显微镜扫描技术及 CT 技术引入冻土力学研究,通过对冻土结构变化的研究来阐明冻土工程性质的改变,从而使中国对冻土微观结构的研究跻身于世界先进行列。为研究深部人工冻土的力学特性,自主研制了高压低温  $K_0$  固结装置,利用本装置,可在室内实现对深部人工冻土形成、受力过程的完全模拟。超声波方法以其无损、快速、简便

等优点在岩土工程勘测及混凝土探测中已成为一种不可缺少的检测方法和手段,而冻土和其他岩体相似的弹性力学性质启发冻土研究者将其用于冻土动力学研究。为此,中国科研人员通过研制适合冻土测量用的纵横波复合宽带超声换能器,成功实现了超声波技术在冻土检测中的应用。日前,大型寒区工程动荷载模型试验系统的研制成功为室内模拟研究青藏铁路路基在运营过程中路基变形和列车荷载作用下冻土的动力学特性创造了条件。钻孔旁压仪作为一种直接的力学试验手段发展至今已有近 50 a 的历史,它具有操作简便、省时,能原位测试出任意深度处地基土的静力学、动力学参数以及土的变形特征,但由于冻土中冰的存在,使得钻孔旁压仪在冻土力学研究中的应用受到限制,喻文兵等利用钻孔旁压仪对青藏公路沿线的多年冻土进行旁压试验,并探讨了旁压试验应用于冻土研究的一些关键技术问题,为今后应用旁压仪现场测定冻土的力学参数奠定了坚实的基础。

## 3 中国冻土力学的发展机遇与选择

中国冻土力学研究经过半个多世纪的发展,无论在研究手段、冻土物理力学性质还是冻害防治方面都取得了丰硕的成果,但它作为一门综合科学,毕竟还很年轻,要去解释复杂多变的冻土现象,更好的服务于寒区经济建设,还有许多问题亟待解决,尤其是西部大开发战略的实施,将会为冻土力学研究提出新问题、新思路和新挑战。预计在未来冻土力学研究中,需主要关注以下几个方面的工作:

(1) 进一步深入开展冻土物理性质、力学行为及机理的研究,建立一整套能够统一描述冻土力学与热力学性质及行为的力学模型,以更加真实的解释和描述冻土的物理力学规律。目前,当人们研究冻土时,不可避免地要采用简化的假定,如根据所关心的问题的不同,有时把它当作弹性体,有时又把它当作刚塑性体,对于冻土力学性质的研究也仅片面研究冻土的强度和变形,很少考虑冻土在其受力过程中水、热状况的改变,这样就不能很好顾及冻土固有本质的完整性。所以,以后应朝着建立能反映冻土力学性质本来面目的数学本构模型的方向发展。

(2) 研究试块强度与现场冻土体强度之间的区别与联系,为室内冻土力学的研究成果成功运用到工程建设创造条件。冻土力学研究虽然是一门基础学科,但我们研究它的目的是为工程建设服务的,所以,只有与工程实际紧密结合且在工程应用中得到检验的冻土力学理论才有生命力。

(3) 在冻土力学研究中,应提倡非确定性研究方

法的应用。冻土是一种特殊土类,它与常规岩土材料一样,具有很大的空间和时间的变异性,另外,冻土工程属于岩土工程的范畴,所以从勘测、设计、试验研究到施工、运营的各阶段都存在许多不确定性。如果将它们完全作为确定性处理,就会抹煞它的随机性,使问题简单化。所以,应该重视非确定性研究方法在冻土力学研究中的应用。

(4)采用冻土的微观和细观研究相结合的研究手段。应用微观手段了解冻土的成因、成分、结构和构造以及在受力过程中颗粒的排列、冰-水的相互转化,应用细观研究手段揭示冻土特性的本质,解释许多力学现象,认清诸如冻土土屈服和破坏的条件、冻土的剪切带和变形局部化等问题。微观和细观研究手段的结合,可使我们对冻土的非线性、弹塑性、各向异性、流变性、应力路径影响以及冻土中孔隙冰的压融性、冻结过程中的水分迁移、成冰过程等有个更为清晰的认识。

(5)冻土力学测试技术的改进,冻土工程测试技术一般分为室内试验技术、原位试验技术和现场监测技术等几个方面。在原位测试方面,地基中的位移场、应力场和温度场的测试,地下结构表面的土压力测试,地基土的强度特性及变形特性测试等方面将会成为研究的重点,随着总体测试技术的进步,这些传统的难点将会取得突破性进展。

(6)解决工程科学问题的数值方法近几十年来已有了很大的发展。由于大型高速电子计算机的使用和大型软件的研制使得这些方法的普及性和灵活性都有了很大的加强。因此,在冻土力学研究领域,发展和应用数值仿真的方法体系将是提高冻土力学试验效率的手段之一。

#### 参考文献:

- [1] 周幼吾, 郭东信, 邱国庆, 等. 中国冻土[M]. 北京: 科学出版社, 2000. (ZHOU You-wu, GUO Dong-xin, QIU Guo-qing, et al. Geocryology in China[M]. Beijing: Science Press, 2000. (in Chinese))
- [2] 中国地理学会. 第一届全国冻土学术会议论文集[M]. 北京: 科学出版社, 1978. (The Geographical Society of China. Proceedings of the first Chinese conference on glaciology and geocryology[M]. Beijing: Science Press, 1978. (in Chinese))
- [3] 中国地理学会. 第二届全国冻土学术会议论文集[M]. 兰州: 甘肃人民出版社, 1982. (The Geographical Society of China. Proceedings of the second Chinese conference on glaciology and geocryology[M]. Lanzhou: Gansu People's Press, 1982. (in Chinese))
- [4] 中国科学院兰州冰川冻土研究所. 青藏冻土研究论文集[M]. 北京: 科学出版社, 1983. (Lanzhou Institute of Glaciology and Cryopedology, CAS. Professional papers of the study on Qinghai-Xizang plateau permafrost[M]. Beijing: Science Press, 1983. (in Chinese))
- [5] 中国科学院兰州冰川冻土研究所. 中国地理学会冰川冻土学术论文集[M]. 北京: 科学出版社, 1982. (Lanzhou Institute of Glaciology and Cryopedology, CAS. Proceedings of the chinese conference on glaciology and geocryology[M]. Beijing: Science Press, 1982. (in Chinese))
- [6] 中国科学院兰州冰川冻土研究所, 煤炭工业部特殊凿井公司冻土壁研究组. 冻结凿井冻土壁的工程性质[M]. 兰州: 兰州大学出版社, 1988. (Lanzhou Institute of Glaciology and Cryopedology, Chinese Academy of Sciences & Frozen Soil Wall Research Group of Special Shaft Sinking Company, Ministry of Coal Industry. Engineering behaviour of frozen wall in artificial freezing sinking[M]. Lanzhou: Lanzhou University Press, 1988. (in Chinese))
- [7] 吴紫汪, 程国栋, 朱林楠, 等. 冻土路基工程[M]. 兰州大学出版社, 1988. (WU Zi-wang, CHENG Guo-dong, ZHU Lin-nan, et al. Embankment engineering of frozen soils[M]. Lanzhou: Lanzhou University Press, 1988. (in Chinese))
- [8] 朱元林, 何平, 张家懿, 等. 冻土在振动荷载作用下的三轴蠕变模型[J]. 自然科学进展, 1998, 8(1): 60 - 62. (ZHU Yuan-lin, HE Ping, ZHANG Jia-yi, et al. Triaxial creep model of frozen soil under dynamic loading[J]. Progress in Natural Science, 1998, 8(1): 60 - 62. (in Chinese))
- [9] 朱元林, 何平, 张家懿, 等. 围压对冻结粉土在振动荷载作用下蠕变性能的影响[J]. 冰川冻土, 1995, 17(增刊): 20 - 25. (ZHU Yuan-lin, HE Ping, ZHANG Jia-yi, et al. Effect of confine pressure on creep behavior of frozen silt under dynamic loading[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 1995, 17(S0): 20 - 25. (in Chinese))
- [10] 吴紫汪, 刘永智, 谢先德. 冻土承载力原位试验研究[M]// 青藏冻土研究论文集. 北京: 科学出版社, 1983: 112 - 119. (WU Zi-wang, LIU Yong-zhi, XIE Xian-de. Field experiments of bearing capacity of frozen soils[M]// Professional Papers on Permafrost Study of Qinghai-Xizang Plateau. Beijing: Science Press, 1983: 112 - 119. (in Chinese))
- [11] 吴紫汪, 张家懿, 朱元林. 冻土长期强度确定方法的实验研究[M]// 青藏冻土研究论文集. 北京: 科学出版社, 1983: 120 - 123. (WU Zi-wang, ZHANG Jia-yi, ZHU Yuan-lin. Experimental research on determination of the long-term

- strength of frozen soils[M]// Professional Papers on Permafrost Studys of Qinghai-Xizang Plateau. Beijing: Science Press, 1983: 120 - 123. (in Chinese))
- [12] 吴紫汪, 马巍, 常小晓, 等. 冻结黄土的应力松弛[J]. 冰川冻土, 1993, **15**(1): 125 - 128. (WU Zi-wang, MA Wei, CHANG Xiao-xiao, et al. Uniaxial stress relaxation of frozen loess[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 1993, **15**(1): 125 - 128. (in Chinese))
- [13] 吴紫汪, 马巍. 冻土的强度与蠕变[M]. 兰州: 兰州大学出版社, 1994. (WU Zi-wang, MA Wei. Strength and creep of frozen soil[M]. Lanzhou: Lanzhou University Press, 1994. (in Chinese))
- [14] 吴紫汪, 蒲毅彬, 马巍, 等. 冻土蠕变过程体积变化 CT 分析[J]. 冰川冻土, 1995, **17**(增刊 1): 41 - 46. (WU Zi-wang, PU Yi-bin, MA Wei, et al. CT analysis on volume change of frozen soil in creep process[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 1995, **17**(S1): 41 - 46. (in Chinese))
- [15] 吴紫汪, 刘永智, 赵希淑, 等. 冻土蠕变的光黏弹性模拟实验[J]. 自然科学进展, 1996, **6**(1): 86 - 92. (WU Zi-wang, LIU Yong-zhi, ZHAO Xi-shu, et al. The photoviscoelastic simulation experiment of frozen soil creep[J]. Progress in Natural Science, 1996, **6**(1): 86 - 92. (in Chinese))
- [16] 吴紫汪, 马巍, 蒲毅彬, 等. 冻土单轴蠕变过程中结构变化的 CT 动态监测[J]. 冰川冻土, 1996, **18**(4): 306 - 311. (WU Zi-wang, MA Wei, PU Yi-bin, et al. Monitoring the change of structures in frozen soil in uniaxial creep process by CT[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 1996, **18**(4): 306 - 311. (in Chinese))
- [17] 吴紫汪, 马巍, 蒲毅彬, 等. 冻土蠕变变形特征的细观分析[J]. 岩土工程学报, 1997, **19**(3): 1 - 6. (WU Zi-wang, MA Wei, PU Yi-bin, et al. Submicroscopic analysis on deformation characteristics in creep process of frozen soil[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 1997, **19**(3): 1 - 6. (in Chinese))
- [18] ZHU Yuan-lin, CARBEE D L. Creep behaviour of frozen silt under constant uniaxial stress[C]// Proc of 4th Inter Conf Permafrost, Fairbanks, Alaska, 1983: 1507 - 1512.
- [19] ZHU Yuan-lin, CARBEE D L. Uniaxial compressive strength of frozen silt under constant deformation rates[J]. Cold Regions science and Technology, 1984(9): 3 - 15.
- [20] ZHU Yuan-lin, CARBEE D L. Strain rate effect on the tensile strength of frozen silt[C]// Proc of 4th Inter Symp On Ground Freezing, Sapporo, 1985: 153 - 157.
- [21] ZHU Yuan-lin, ZHANG Jia-yi, SHEN Zhong-yan. Uniaxial compressive strength of frozen medium sand under constant deformation rates[C]// 5th Inter Symposium on Ground Freezing, Nottingham, England. 1988: 225 - 232.
- [22] ZHU Yuan-lin, CARBEE D L. Tensile strength of frozen silt[C]// USA CRREL Report, 87-15.
- [23] 马巍, 吴紫汪, 盛煜. 冻土的蠕变及蠕变强度[J]. 冰川冻土, 1994, **16**(2): 113 - 118. (MA Wei, WU Zi-wang, SHENG Yu. Creep and creep strength of frozen soil[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 1994, **16**(2): 113 - 118. (in Chinese))
- [24] 马巍, 吴紫汪, 盛煜. 围压对冻土强度特性的影响[J]. 岩土工程学报, 1995, **17**(5): 7 - 11. (MA Wei, WU Zi-wang, SHENG Yu. Effect of confining pressure on strength behaviour of frozen soil[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 1995, **17**(5): 7 - 11. (in Chinese))
- [25] 马巍, 吴紫汪, 常小晓, 等. 剪应力强度和平均法向应力对冻土变形的相互影响[J]. 自然科学进展, 1998, **8**(1): 77 - 81. (MA Wei, WU Zi-wang, CHANG Xiao-xiao, et al. The influence of shear stress strength and mean normal stress on the frozen soils deformation[J]. Progress in Nature Science, 1998, **8**(1): 77 - 81. (in Chinese))
- [26] 令锋, 吴紫汪, 朱元林, 等. 冻土应力 - 应变曲线的分形逼近[J]. 中国科学 D 辑, 1999, **29**(增刊 1): 15 - 20. (LING Feng, WU Zi-wang, ZHU Yuan-lin, et al. Fractal approximation of the stress-strain curve of frozen soil[J]. Science China Series D, 1999, **29**(S1): 15 - 20. (in Chinese))
- [27] 朱志武, 宁建国, 马巍. 冻土屈服面与屈服准则的研究[J]. 固体力学学报, 2006, **27**(3): 307 - 310. (ZHU Zhi-wu, NING Jian-guo, MA Wei. Study on yield surface and yield criterion of frozen soil[J]. Acta Mechanica Solida Sinica, 2006, **27**(3): 307 - 310. (in Chinese))
- [28] 马巍, 吴紫汪, 张长庆. 冻土的强度与屈服准则[J]. 自然科学进展, 1994, **4**(3): 319 - 322. (MA Wei, WU Zi-wang, ZHANG Chang-qing. Strength and Yield criteria of frozen soil[J]. Progress in Natural Science, 1994, **4**(3): 319 - 322. (in Chinese))
- [29] 何平, 程国栋, 杨成松, 等. 非饱和冻土的强度分析[J]. 冰川冻土, 2002, **24**(3): 260 - 263. (HE Ping, CHENG Guo-dong, YANG Cheng-song, et al. Analysis of strength of unsaturated frozen soil[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2002, **24**(3): 260 - 263. (in Chinese))
- [30] 徐学燕, 仲丛利, 陈亚明, 等. 冻土的动力特性研究及其参数确定[J]. 岩土工程学报, 1998, **20**(5): 77 - 81. (XU Xue-yan, ZHONG Cong-li, CHEN Ya-ming, et al. Research

- on dynamic characters of frozen soil and determination of its parameters[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 1998, **20**(5): 77 - 81. (in Chinese))
- [31] 徐学燕, 仲丛利. 冻土动弹模、动泊桑比的确定[J]. 哈尔滨建筑大学学报, 1997, **30**(4): 23 - 29. (XU Xue-yan, ZHONG Cong-li. The determination of dynamic elastic modulus and dynamic Poisson's ratio of frozen soil[J]. Journal of Harbin University of C E & Architecture, 1997, **30**(4): 23 - 29. (in Chinese))
- [32] 凌贤长, 徐学燕, 邱明国, 等. 冻结哈尔滨粉质黏土动三轴试验CT检测研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2003, **22**(8): 1244 - 1249. (LING Xian-chang, XU Xue-yan, QIU Ming-guo, et al. Study on CT scanning of harbin frozen silty clay before and after dynamic triaxial test[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2003, **22**(8): 1244 - 1249. (in Chinese))
- [33] 徐春华, 徐学燕, 邱明国, 等. 循环荷载下冻土的动阻尼比试验研究[J]. 哈尔滨建筑大学学报, 2002, **35**(6): 22 - 25. (XU Chun-hua, XU Xue-yan, QIU Ming-guo, et al. Experimental study on dynamic damping ratio of frozen soil under cyclic loading[J]. Journal of Harbin University of C.E.& Architecture, 2002, **35**(6): 22 - 25. (in Chinese))
- [34] 赵淑萍, 何平, 朱元林, 等. 荷载振动频率对冻结兰州细砂蠕变特性的影响[J]. 岩石力学与工程学报, 2006, **25**(增刊 2): 4097 - 4103. (ZHAO Shu-ping, HE Ping, ZHU Yuan-lin, et al. Impact of load vibration frequency on creep characteristics of frozen lanzhou fine-sand[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2006, **25**(S2): 4097 - 4103. (in Chinese))
- [35] 苗天德, 魏雪霞, 张长庆. 冻土蠕变过程的微结构损伤理论[J]. 中国科学 B 辑, 1995, **25**(3): 309 - 316. (MIAO Tian-de, WEI Xue-xia, ZHANG Chang-qing. Microstructural damage theories of creep of frozen soil[J]. Science in China(Series B), 1995, **25**(3): 309 - 317. (in Chinese))
- [36] 刘增利, 李洪升, 朱元林. 冻土单轴压缩损伤特征与细观损伤测试[J]. 大连理工大学学报, 2002(2): 223 - 227. (LIU Zeng-li, LI Hong-sheng, ZHU Yuan-lin. Damage characteristics and micro-crack damage measurement of frozen soil under uni-axial compression[J]. Journal of Da-lian University of Technology, 2002(2): 223 - 227. (in Chinese))
- [37] 李洪升, 王悦东, 刘增利. 冻土中微裂纹尺寸的识别与确认[J]. 岩土力学, 2004, **25**(4): 534 - 537. (LI Hong-sheng, WANG Yue-dong, LIU Zeng-li. Identification and determination of micro-crack size for frozen soil[J]. Rock and Soil Mechanics, 2004, **25**(4): 534 - 537. (in Chinese))
- [38] 李洪升, 张小鹏, 朱元林, 等. 冻土断裂韧度  $K_{IC}$  的测试研究[J]. 冰川冻土, 1995, **17**(4): 328 - 333. (LI Hong-sheng, ZHANG Xiao-peng, ZHU Yuan-lin, et al. Experimental studies of fracture toughness  $K_{IC}$  for frozen soil[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 1995, **17**(4): 328 - 333. (in Chinese))
- [39] 刘增利, 李洪升, 朱元林, 等. 冻土 I - II 型复合断裂准则的试验研究[J]. 岩土工程学报, 1999, **21**(2): 148 - 152. (LIU Zeng-li, LI Hong-sheng, ZHU Yuan-lin, et al. Experimental study of criteria of compound fracture for frozen soil[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 1999, **21**(2): 148 - 152. (in Chinese))
- [40] 李洪升, 刘增利, 朱元林, 等. 冻土断裂韧度测试的理论与方法[J]. 岩土工程学报, 2000, **22**(1): 61 - 65. (LI Hong-sheng, LIU Zeng-li, ZHU Yuan-lin, et al. Theory and methods on tests of the fracture toughness  $K_{IC}$  of frozen soil[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2000, **22**(1): 61 - 65. (in Chinese))
- [41] 李洪升, 刘晓洲, 刘增利. 冻土断裂力学破坏准则及其在工程中的应用[J]. 土木工程学报, 2006, **39**(1): 65 - 78. (LI Hong-sheng, LIU Zeng-li, ZHU Yuan-lin, et al. Theory and methods on tests of the fracture toughness  $K_{IC}$  of frozen soil [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2006, **39**(1): 65 - 78. (in Chinese))
- [42] 马小杰, 张建明, 常小晓, 等. 高温 - 高含冰量冻土蠕变试验研究[J]. 岩土工程学报, 2007, **29**(6): 848 - 851. (MA Xiao-jie, ZHANG Jian-ming, CHANG Xiao-xiao, et al. Experimental study on creep of warm and ice-rich frozen soil[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2007, **29**(6): 848 - 85. (in Chinese))
- [43] 赖远明, 张耀, 张淑娟, 等. 超饱和含水率和温度对冻结砂土强度的影响[J]. 岩土力学, 2007, **29**(6): 3665 - 3670. (LAI Yuan-ming, ZHANG Yao, ZHANG Shu-juan, et al. Experimental study of strength of frozen sandy soil under different water contents and temperatures[J]. Rock and Soil Mechanics, 2007, **29**(6): 3665 - 3670. (in Chinese))
- [44] 赖远明, 李双洋, 高志华, 等. 高温冻结黏土单轴随机损伤本构模型及强度分布规律[J]. 冰川冻土, 2007, **29**(6): 969 - 976. (LAI Yuan-ming, LI Shuang-yang, GAO Zhi-hua, et al. Stochastic damage constitutive model for warm frozen soil under uniaxial compression and its strength distribution[J]. Journal of Glaciology and Geocryology,

- 2007, **29**(6): 969 - 976. (in Chinese))
- [45] 崔广心. 深土冻土力学—冻土力学发展的新领域[J]. 冰川冻土, 1998, **20**(2): 97 - 100. (CUI Guang-xin. Mechanics of frozen soil for deep alluvium—a new field of frozen soil mechanics[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 1998, **20**(2): 97 - 100. (in Chinese))
- [46] 崔广心. 我国人工冻结工程研究现状及展望[C]// 第五届全国冰川冻土学大会论文集(下). 兰州: 甘肃文化出版社, 1996: 843 - 851. (CUI Guang-xin. The artificial frozen engineering in China: present state and perspective[C]// The Proceedings of the 5th national conference on glaciology and geocryology. Lanzhou: Gansu Cultural Press, 1996: 843 - 851. ((in Chinese))
- [47] 马巍, 吴紫汪, 常小晓. 固结过程对冻土应力-应变特性的影响[J]. 岩土力学, 2000, **21**(3): 198 - 200. (MA Wei, WU Zi-wang, CHANG Xiao-xiao. Effects of consolidation process on stress-strain characters of frozen soils[J]. Rock and Soil Mechanics, 2000, **21**(3): 198 - 200. (in Chinese))
- [48] MA Wei, CHANG Xiao-xiao. Analyses of strength and deformation of an artificially frozen soil wall in underground engineering[J]. Cold Regions Science and Technology, 2002(1): 11 - 17.
- [49] 马巍, 常小晓. 加载卸载对人工冻结土强度与变形的影响[J]. 岩土工程学报, 2001, **23**(5): 563 - 566. (MA Wei, CHANG Xiao-xiao. Influence of loading and unloading on strength and deformation of frozen soil[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2001, **23**(5): 563 - 566. (in Chinese))
- [50] 马巍, 常小晓. 两种不同试验模式下人工冻结土强度与变形的对比分析[J]. 冰川冻土, 2002, **24**(2): 149 - 154. (MA Wei, CHANG Xiao-xiao. Comparison of strength and deformation of artificially frozen soil in two testing manners[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2002, **24**(2): 149 - 154. (in Chinese))
- [51] WANG Da-yan, MA Wei, CHANG Xiao-xiao. Analyses of behaviour of stress-strain of frozen Lanzhou loess subjected to  $K_0$  consolidation[J]. Cold Regions Science and Technology, 2004, **40**: 19 - 29.
- [52] WANG Da-yan, MA Wei, CHANG Xiao-xiao, WANG Ai-guo. Study on the resistance to deformation of artificially frozen soil in deep alluvium[J]. Cold Regions Science and Technology, 2005, **42**(3): 194 - 200.
- [53] WANG Da-yan, MA Wei, WEN Zhi, et al. Study on strength of artificially frozen soils in deep alluvium[J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2008, **23**(4): 381 - 388.
- [54] WANG Da-yan, MA Wei, WEN Zhi, et al. Stiffness of frozen soils subjected to  $K_0$  consolidation before freezing[J]. Soils and Foundations, 2007, **47**(5): 991 - 997.
- [55] 朱元林, 张家懿, 彭万巍, 等. 冻土的单轴压缩本构模型[J]. 冰川冻土, 1992, **14**(3): 210 - 217. (ZHU Yuan-lin, ZHANG Jia-yi, PENG Wan-wei, et al. Constitutive relations of frozen soil in uniaxial compression[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 1992, **14**(3): 210 - 217. (in Chinese))
- [56] 蔡中民, 朱元林, 张长庆. 冻土的黏弹塑性本构模型及材料参数的确定[J]. 冰川冻土, 1990, **12**(1): 31 - 40. (CAI Zhong-min, ZHU Yuan-lin, ZHANG Chang-qing. Viscoelastoplastic constitutive model of frozen soil and determination of its parameters[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 1990, **12**(1): 31 - 40. (in Chinese))
- [57] 苗天德, 魏雪霞, 张长庆. 冻土蠕变过程的微结构损伤理论[J]. 中国科学 B 辑, 1995, **25**(3): 309 - 317. (MIAO Tian-de, WEI Xue-xia, ZHANG Chang-qing. Microstructural damage theories of creep of frozen soil[J]. Science in China (Series B), 1995, **25**(3): 309 - 317. (in Chinese))
- [58] 何平, 程国栋, 朱元林. 冻土黏弹损伤耦合本构理论[J]. 中国科学 D 辑, 1999, **29**(增刊): 34 - 39. (HE Ping, CHENG Guo-dong, ZHU Yuan-lin. Permafrost viscoelastic-damage coupled plastic constitutive theory[J]. Science in China (Series B), 1999, **29**(S0): 34 - 39. (in Chinese))
- [59] 宁建国, 王慧, 朱志武, 等. 基于细观力学方法的冻土本构模型研究[J]. 北京理工大学学报, 2005, **25**(10): 847 - 851. (NING Jian-guo, WANG Hui, ZHU Zhi-wu, et al. Investigation of the constitutive model of frozen soil based on meso-mechanics[J]. Transactions of Beijing Institute of Technology, 2005, **25**(10): 847 - 851. (in Chinese))
- [60] 刘增利, 张小鹏, 李洪升. 基于动态 CT 识别的冻土单轴压缩损伤本构模型[J]. 岩土力学, 2005, **26**(4): 542 - 546. (LIU Zeng-li, ZHANG Xiao-peng, LI Hong-sheng. A damage constitutive model for frozen soils under uniaxial compression based on CT dynamic distinguishing[J]. Rock and Soil Mechanics, 2005, **26**(4): 542 - 546. (in Chinese))
- [61] 徐学祖, 奥利奋特 J L, 泰斯 A R. 土水势、未冻水含量和温度[J]. 冰川冻土, 1985, **7**(1): 1 - 14. (XU Xue-zu, OLIPHANT J L, TICE A R. Soil water potential, unfrozen water content and temperature[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 1985, **7**(1): 1 - 14.
- [62] XU Xue-zu, ZHANG Li-xin, WANG Jia-cheng. Establish-

- ment of a model for predicting unfrozen water content[C]// Proceedings of the 7th International Symposium on Ground Freezing, 1995: 65 - 68.
- [63] XU Xue-zu, ZHANG Li-xin, DENG You-sheng. Unfrozen water content in multi-crystal ice[C]// Proceedings of 6th Intern.Conf. on Permafrost, 1993: 1295 - 1297.
- [64] 张立新, 徐学祖, 陶兆祥, 等. 含氯化钠盐冻土中溶液的二次相变分析[J]. 自然科学进展, 1993, 3(1): 48 - 52. (ZHAN Li-xin, XU Xue-zu, TAO Zhao-xiang, et al. The second phase transformation analysis of the frozen soils with NaCl[J]. Progress in Natural Science, 1993, 3(1): 48 - 52. (in Chinese))
- [65] 徐学祖, 邓友生. 土冻融过程中未冻水含量和冻融温度及土水势的变化[C]// 第四届全国冰川冻土学术会议论文集(冻土学). 北京: 科学出版社, 1990: 64 - 76. (XU Xue-zu, DENG You-sheng. The variation of unfrozen soils water, freezing-thawing temperature and soil water potential during the process of soil freezing-thawing[C]// The Proceedings of the 4th National Conference of Glaciology and Geocryology (Cryopedology). Beijing: Science Press, 1990: 64 - 76. (in Chinese))
- [66] ZHANG Li-xin, XU Xue-zu. The influence of freezing-thawing process on the unfrozen water content of frozen saline soil[C]// Proceedings of 7th International Symposium on Ground Freezing, 1994: 93 - 97.
- [67] 程国栋. 季节冻结和融化层中未冻水的单向积聚效应[J]. 科学通报, 1981, 26(23): 1448 - 1451. (CHENG Guo-dong. Unidirectional aggregation effect of unfrozen water under seasonal frost and thaw layer[J]. Chinese Science Bulletin, 1981, 26(23): 1448 - 1451. (in Chinese))
- [68] XU Xue-zu. Water and solute migration of freezing soils in the closed system under temperature gradients[C]// Proceedings of the 6th International Symposium on Ground Freezing, 1991: 93 - 98.
- [69] XU Xue-zu, DENG You-sheng, WANG Jia-cheng. Water migration saturated freezing soil[C]// Proceedings of 5th Intern. Conf. on Permafrost, 1988: 516 - 521.
- [70] XU Xue-zu, OLIPHANT J L, TICE A R. Experimental study on factors affecting water migration in frozen morin clay[C]// Proceedings of 4th Intl. Symp. on Ground Freezing, 1985(1): 123 - 128.
- [71] 徐学祖, 邓友生, 王家澄, 等. 封闭系统非饱和含氯化钠盐正冻土中的水盐迁移[C]// 第五届全国冰川冻土学大会论文集. 兰州: 甘肃文化出版社, 1996: 601 - 606. (XU Xue-zu, DENG You-sheng, WANG Jia-cheng, et al. Water and solute migration in unsaturated freezing saline soil with NaCl in a close system[C]// Proceeding on the fifth Chinese Conference on Glaciology and Geocryology. Lanzhou: Gansu Culture Press, 1996: 601 - 606. (in Chinese))
- [72] 盛煜, 马巍, 侯仲杰. 正冻土中水分迁移的迁移势模型[J]. 冰川冻土, 1993, 15(1): 140 - 143. (SHENG Yu, MA Wei, HOU Zhong-jie. A model of migration potential for moisture migration during soil freezing[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 1993, 15(1): 140 - 143. (in Chinese))
- [73] XU Xue-zu, WANG Jia-cheng, ZHANG Li-xin, et al. Mechanism of frost heave by film water migration under temperature gradient[J]. Chinese Science Bulletin, 1997, 42(15): 1290 - 1293.
- [74] 周国庆. 间歇冻结抑制人工冻土冻胀机理分析[J]. 中国矿业大学学报, 1999, 28(5): 413 - 416. (ZHOU Guo-qing. Analysis of mechanism of restraining soil freezing swelling by using intermission method[J]. Journal of China University of Mining & Technology, 1999, 28(5): 413 - 416. (in Chinese))
- [75] 周金生, 周国庆, 马巍, 等. 间歇冻结控制人工冻土冻胀的试验研究[J]. 中国矿业大学学报, 2006, 35(6): 708 - 712. (ZHOU Jin-sheng, ZHOU Guo-qing, MA Wei, et al. Experimental research on controlling frost heave of artificial frozen soil with intermission freezing method[J]. Journal of China University of Mining & Technology, 2006, 35(6): 708 - 712. (in Chinese))
- [76] 王家澄, 刘继民. 土冻结时的物理过程和冷生组构[C]// 第三届全国冻土学术会议论文集. 北京: 科学出版社, 1989: 78 - 84. (WANG Jia-cheng, LIU Ji-ming. The physical process of the soil freezing and cryostructure[C]// The Proceedings of the 3th National Conference of Glaciology and Geocryology. Beijing: Science Press, 1989: 78 - 84. (in Chinese))
- [77] 王家澄, 徐学祖, 邓友生. 压力对冻土孔隙特征的影响[J]. 冰川冻土, 1993, 15(1): 160 - 165. (WANG Jia-cheng, XU Xue-zu, DENG You-sheng. Pressure influence on pore characteristic of frozen soils[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 1993, 15(1): 160 - 165. (in Chinese))
- [78] 王家澄, 徐学祖, 张立新, 等. 温度和压力条件对正冻土中成冰过程和冷生组构的影响[J]. 冰川冻土, 1995, 17(3): 250 - 257. (WANG Jia-cheng, XU Xue-zu, ZHANG Li-xin, et al. Influence of temperature and pressure on cryogenic

- structure of freezing soil[J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 1995, **17**(3): 250 - 257. (in Chinese)
- [79] 程国栋. 厚层地下冰的形成过程[J]. *中国科学 B 辑*, 1982(3): 281 - 288. (CHENG Guo-dong. The formation of thick ground ice[J]. *Science in China(Series B)*, 1982(3): 281 - 288. (in Chinese))
- [80] 李萍, 徐学祖, 蒲毅彬, 等. 利用图像数字化技术分析冻结缘特征[J]. *冰川冻土*, 1999, **21**(2): 175 - 180. (LI Ping, XU Xue-zu, PU Yi-bin, et al. Analyses of characteristics of frozen fringe ba using the digital technique of picture[J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 1999, **21**(1): 175 - 180. (in Chinese))
- [81] SHEN Mu, LADANYI B. Modelling of coupled heat, moisture and stress field in freezing soil[J]. *Cold Regions Science and Technology*, 1987, **14**: 237 - 246.
- [82] ZHANG Li-xin, PU Yi-bin, LIAO Quan-rong, et al. Dynamic investigation on the coupled changing process of moisture and density fields in freezing soil[J]. *Science in China*, 1999, **42**(2): 141 - 145.
- [83] 何平, 程国栋, 俞祁浩, 等. 饱和正冻土中的水、热、力场耦合模型[J]. *冰川冻土*, 2000, **22**(2): 135 - 138. (HE Ping, CHENG Guo-dong, YU Qi-hao, et al. A couple model of heat, water and stress fields of saturated soil during freezing[J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2000, **22**(2): 135 - 138. (in Chinese))
- [84] 王铁行, 胡长顺. 多年冻土地区路基温度场和水分迁移场耦合问题研究[J]. *土木工程学报*, 2003, **36**(12): 93 - 97. (WANG Tie-hang, HU Chang-shun. Study on the problem of coupled temperature field and moisture migration field of subgrade in permafrost region[J]. *China Civil Engineering Journal*, 2003, **36**(12): 93 - 97. (in Chinese))
- [85] 李洪升, 刘增利, 李南生. 基于冻土水分温度和外荷载相互作用的冻胀模式[J]. *大连理工大学学报*, 1998, **38**(1): 29 - 33. (LI Hong-sheng, LIU Zeng-li, LI Nan-sheng. A frost heave model based on moisture temperature and applied load interaction in frozen soil[J]. *Journal of Dalian University of Technology*, 1998, **38**(1): 29 - 33. (in Chinese))
- [86] 李洪升, 刘增利, 梁承姬. 冻土水热力耦合作用的数学模型及数值模拟[J]. *力学学报*, 2001, **33**(5): 621 - 629. (LI Hong-sheng, LIU Zeng-li, LIANG Cheng-ji. Mathematical model for coupled moisture, heat and stress field and numerical simulation of frozen soil[J]. *Acta Mechanica Sinica*, 2001, **33**(5): 621 - 629. (in Chinese))
- [87] 苗天德, 郭力, 牛永红, 等. 正冻土中水热迁移问题的混合物理论模型[J]. *中国科学 D 辑*, 1999, **29**(增刊): 8 - 14. (MIAO Tian-de, GUO Li, NIU Yong-hong, et al. Modeling on coupled heat and moisture transfer in freezing soil using mixture theory[J]. *Science in China(Series D)*, 1999, **29**(S0): 8 - 14. (in Chinese))
- [88] 陈飞熊, 李宁, 程国栋. 饱和正冻土多孔多相介质的理论构架[J]. *岩土工程学报*, 2002, **24**(2): 213 - 217. (CHEN Fei-xiong, LI Ning, CHENG Guo-dong. The theoretical frame of multi-phase porous medium for the freezing soil[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2002, **24**(2): 213 - 217. (in Chinese))
- [89] 陈飞熊, 李宁, 徐彬. 非饱和正冻土的三场耦合理论框架[J]. *力学学报*, 2005, **37**(2): 204 - 214. (CHEN Fei-xiong, LI Ning, XU Bin. Theoretical frame for unsaturated freezing soil[J]. *Acta Mechanica Sinica*, 2005, **37**(2): 204 - 214. (in Chinese))
- [90] 李宁, 陈波, 陈飞熊. 寒区复合地基的温度场、水分场与变形场三场耦合模型[J]. *土木工程学报*, 2003, **36**(10): 66 - 71. (LI Ning, CHEN Bo, CHEN Fei-xiong. Heat-moisture-deformation coupled model for composite foundation in cold zone[J]. *China Civil Engineering Journal*, 2003, **36**(10): 66 - 71. (in Chinese))
- [91] 吴紫汪. 多年冻土工程分类[J]. *冰川冻土*, 1979, **2**(2): 52 - 60. (WU Zi-wang. Classification of permafrost in engineering constructions[J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 1979, **2**(2): 52 - 60. (in Chinese))
- [92] 吴紫汪. 冻土工程分类[J]. *冰川冻土*, 1982, **4**(4): 43 - 48. (WU Zi-wang. Classification of frozen soils in engineering constructions[J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 1982, **4**(4): 43 - 48. (in Chinese))
- [93] 吴紫汪, 朱林楠, 郭兴民, 等. 青康公路多年冻土区路堤的临界高度[J]. *冰川冻土*, 1998, **20**(1): 36 - 43. (WU Zi-wang, ZHU Lin-nan, GUO Xing-min, et al. Critical height of the embankment in the permafrost regions along the qinghai-kangding highway[J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 1998, **20**(1): 36 - 43. (in Chinese))
- [94] 丁德文, 程国栋. 冻土路堤高度及其冻融变形计算[C]// 第二届全国冻土学术会议论文集. 兰州: 甘肃人民出版社, 1983: 398 - 404. (DING De-wen, CHENG Guo-dong. The calculation of the road embankment height and the freezing-thawing deformation[C]// *The Proceedings of the 2nd National Conference of Geocryology*. Lanzhou: GanSu People's Publishing House, 1983: 398 - 404. (in Chinese))
- [95] 黄小铭. 青藏高原多年冻土区铁路路堤临界高度的确定

- [C]// 第二届全国冻土学术会议论文集. 兰州: 甘肃人民出版社, 1983: 391 - 397. (HUANG Xiao-ming. The determination for the critical height of railway embankment in the Qing-Tibet plateau permafrost[C]// The Proceedings of the 2nd National Conference of Geocryology. Lanzhou: GanSu People's Publishing House, 1983: 391 - 397. (in Chinese))
- [96] 黄小铭. 我国寒区道路工程中冻土问题研究的回顾[J]. 冰川冻土, 1988, **10**(3): 344 - 351. (HUANG Xiao-ming. Review about the research on permafrost problems of road engineering in cold region, in China[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 1988, **10**(3): 344 - 351. (in Chinese))
- [97] CHEN Xiao-bai, WANG Ya-qing, HE Ping. Ice segregation and frost susceptibility of sandy gravel during freezing in open system. Chinese Science Bulletin, 1989, **34**(3): 216 - 219.
- [98] 徐绍新. 季节冻土区水工建筑物抗冻害技术研究的成就与展望[C]// 第五届全国冰川冻土学大会论文集(上). 兰州: 甘肃文化出版社, 1996: 291 - 298. (XU Shao-xin. Achievement and prospect on the studies of technological measures against frost damage for hydro-structures in seasonally frozen ground regions[C]// Proceeding of the 5th Chinese conference on glaciology and geocryology. Lanzhou: Gansu Culture Press, 1996: 291 - 298. (in Chinese))
- [99] 刘鸿绪. 法向冻胀力计算——层状空间半无限直线变形体计算在冻土地基中的应用[J]. 冰川冻土, 1981, **2**: 13 - 17. (LIU Hong-xu. On calculation of normal frost heaving force[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 1981, **2**: 13 - 17. (in Chinese))
- [100] 丁靖康, 娄安金. 水平冻胀力的现场测定方法[J]. 冰川冻土, 1980(增刊 1): 33 - 36. (DING Jing-kang, LOU An-jin. The measure methods of the horizontal frost-heave forces in fields[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 1980(S1): 33 - 36. (in Chinese))
- [101] 朱 强, 付思宁, 武福学, 等. 论季节冻土的冻胀沿冻深分布[J]. 冰川冻土, 1988, **10**(1): 1 - 7. (ZHU Qiang, FU Si-ning, WU Fu-xue, et al. On the frost heave distribution along depth[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 1988, **10**(1): 1 - 7. (in Chinese))
- [102] 童长江, 管枫年. 土的冻胀与建筑物冻害防治[M]. 北京: 水利水电出版社, 1985. (TONG Chang-jiang, GUAN Feng-nian. The soil frost heave and the treatment for freezing damage[M]. Beijing: China Water Power Press, 1985. (in Chinese))
- [103] 陈卓怀. 多年冻土地区铁路桥涵基础[C]// 第二届全国冻土学术会议论文集. 兰州: 甘肃人民出版社, 1983: 412 - 418. (CHEN Zhuo-huai. The railway bridge and culvert base in permafrost[C]// The Proceedings of the 2nd National Conference of Geocryology. Lanzhou: GanSu People's Publishing House, 1983: 412 - 418. (in Chinese))
- [104] 励国良, 赵西生, 王化卿, 等. 多年冻土地区桩基试验研究[C]// 冰川冻土学术会议论文集. 北京: 科学出版社, 1983: 154 - 160. (LI Guo-liang, ZHAO Xi-sheng, WANG Hua-qing, et al. The experimental study on the pile basement in permafrost[C]// Proceeding of the Chinese Conference on Glaciology and Geocryology. Beijing: Science Press, 1983: 154 - 160. (in Chinese))
- [105] 何春雄, 吴紫汪, 朱林楠. 严寒地区隧道围岩冻融状况分析的导热与对流换热模型[J]. 中国科学 D 辑, 1999, **29**(增刊): 1 - 7. (HE Chun-xiong, WU Zi-wang, ZHU Lin-nan. A convection-conduction model for analysis of the freeze-thaw conditions in the surrounding rock wall of a tunnel in permafrost regions[J]. Science in China(Series D), 1999, **29**(S0): 1 - 7. (in Chinese))
- [106] 赖远明. 寒区隧道温度场、渗流场和应力场耦合问题的非线性分析[D]. 北京: 中国科学院. (LAI Yuan-ming. Nonlinear analysis for the coupled problem of temperature, seepage and stress fields in cold regions tunnels[D]. Beijing: Chinese Academy of Sciences. (in Chinese))
- [107] 张学富, 苏新民, 赖远明, 等. 寒区隧道三维温度场非线性分析[J]. 土木工程学报, 2004, **37**(2): 47 - 53. (ZHANG Xue-fu, SU Xin-min, LAI Yuan-ming, et al. Non-linear analysis for three-dimensional temperature fields in cold-region tunnels[J]. China Civil Engineering Journal, 2004, **37**(2): 47 - 53. (in Chinese))