

冻土力学的研究进展与思考*

李 宁^{1,2} 程国栋¹ 徐学祖¹ 朱元林¹

¹ 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, 兰州 730000

² 西安理工大学岩土所, 西安 710048

摘 要 从冻结土的宏观力学性质, 正冻土中的水、热迁移理论, 正冻土的水热力耦合模型四个方面分析综述了国内外冻土力学的发展历史、研究现状与我国冻土力学研究中存在的问题, 指出: (1) 当前冻土力学的研究内容应该从对冻结土的宏观强度与变形性质向更切合实际工程需要的正冻土、正融土微、细观热、力学耦合性质方面深化; (2) 冻土力学的研究思路应该从对土样纯力学量的试验研究向土样组构、级配、含水量、饱和度等土性指标在不同负温下对土样颗粒排列与胶结特性的强度、变形影响机理方面转移; (3) 冻土力学的研究对象也应该从室内冻结试验的研究向具有各种不同水热交换边界条件与水热迁移内在规律的冻土体发展.

关键词 冻土力学, 水热迁移, 水热力耦合模型, 正冻土, 正融土

从崔托维奇的第一部“冻土力学”^[1]问世以来, 冻土力学的研究走过了一条漫长崎岖的发展道路. 从早期直接服务于寒区工程设计的简单的唯象学上的冻土宏观力学性质的研究, 到七、八十年代探索冻害原因的冻土细观机制实验研究; 从对冻结土力学性质的研究到更切合实际工程需要的正冻土、正融土力学性质的研究; 从只针对冻土骨架固相的力学性质的试验研究, 到考虑了冻土中固、液、气多相多孔介质的力学响应的研究; 从只研究冻土的力学性质, 到开始研究冻土的水、热、力耦合机理; 从了解冻土和利用冻土, 到主动地对冻土进行改造; 从被动的冻土体(路基、边坡、围岩等)稳定性可估, 到主动的可控. 冻土力学的发展似可从以下几个层次论述.

1 冻土的宏观力学性质的研究现状

受寒区工程建设的迫切需要, 冻土的宏观力学性质的研究发展迅速^[2~12]. 笔者将冻土力学按研究内容分成两类: 即应用冻土力学与实验冻土力学. 实验冻土力学以室内实验为主, 从 50 年代到 80 年代, 陆续系统地对冻土在不同负温、不同土性、不同初始含水量、不同荷载下的强度与变形性质进行了实验研究, 并提出了相应的实验拟合数学力学模型. 对工程上常用已冻土的力学性质如不同温度下的变形模型 E 、泊松比 μ 、粘聚力 C 、内摩擦角 ϕ 以及冻土特殊的流变性质等进行了长期系统的实验研究. 其中, 在不同研究点上的代表性进展可大致归纳如下: 吴紫汪、马巍^[2,3] 对不同围压下冻土的三轴抗剪强度特性做了系统实验研究, 指出冻土的

收稿日期: 2000-01-17, 修回日期: 2000-05-15

* 国家自然科学基金(19772093)与中科院院长基金联合资助项目

抗剪强度随围压增大而增大,与普通融土的强度性质相同,但当围压大于某一极限值后,围压的继续增大则加速了空隙冰的压融,降低了冻土的粒间联结强度,导致冻土弱化;朱元林、何平等^[4~6]对冻结粉土在往返荷载作用下的变形特性及不同动载频率下冻土的强度特性进行了实验研究,发现冻结粉土在振动荷载作用下的破坏应变基本与围压无关,其平均值约为相同条件下静载蠕变破坏应变的一半,冻土在振动荷载作用下的蠕变破坏准则与静载下具有相同的形式,冻土在振动荷载作用下颗粒发生了明显的定向排列,这是导致蠕变强度和破坏应变减小的主要原因;李洪升等^[7]对冻土的断裂特性进行了较系统的实验研究,发现在 $-2^{\circ}\text{C}\sim-10^{\circ}\text{C}$ 温度范围内, K_{IIC} 随温度的降低呈线性递增,在 $50\sim 100\text{N/s}$ 加荷速率范围内, K_{IIC} 与加荷速率基本无关.盛煜等^[8]进行了冻土在变载和变温条件下的蠕变实验研究后指出冻土在变应力过程中的蠕变破坏时间基本符合破损度线性累加原理,结合冻土的长期强度曲线即可得到冻土在变应力过程中的长期破坏时间准则.俞祁浩等^[9]还对冻土的抗冲击强度进行了试验研究.

与此同时,应用冻土力学在飞速发展的寒区工程建设的巨大动力推动下得到了全面发展.以冻土体给工程造成直接危害的冻胀、融沉性质为核心的研究课题纷纷展开.徐绍新等^[10]对位于冻土上的建筑物将承受的切向、法向、水平向冻胀力的影响因素及取值范围进行了系统研究.他将影响冻胀力的因素归纳为自然条件和工程条件两大类.

自然条件包括:

- (1) 土质因素:土的矿物成分、颗粒组成、盐分、密度、渗透性和压缩性等;
- (2) 水分因素:冻结时的含水量、含冰量、未冻水含量、水分迁移方式及地下水位等;
- (3) 温度因素:冻结指数、冻结速率、有无覆盖保温等温度场初始条件与边界条件.

工程条件包括:

- (1) 载荷因素:载荷大小、载荷形式、加荷速率等;
- (2) 结构因素:基础结构物尺寸、边界热力条件等.

朱林楠等^[11]对冻土退化环境下的道路工程的设计原则与设计方法,提出了严格保护、部分保护、不保护等设计原则与方法;李东庆^[12]用动态模拟计算分析方法,研究了在气候变暖条件下和人为因素共同作用下多年冻土的退化情况,把道路运营时间引入了多年冻土地区路堤临界高度的确定中,为多年冻土地区各类型路段修筑路堤临界高度的确定提供了一条新途径;令锋^[13]将数学物理问题的数值方法应用于冻土路基热状况动态特征的模拟研究,对路堤边坡坡度对冻土路基热状况的影响,铺设保温材料对冻土路基热状况的作用,施工季节对路基热状况的影响,道路坡向对路基热状况的影响,修筑保温护道对冻土路基热状况的作用及修筑于斜坡上冻土路基的热状况动态特征等冻土路基建设中的实际问题进行了数值分析研究.李安国^[14]对渠道等线型建筑物的设计冻深进行了研究,提出了确定设计冻深的方法;刘鸿绪^[15]对建筑的不同基础下的冻胀力进行了系统分析与评述;丁靖康^[16]对冻土区挡土建筑物的设计和冻胀力计算进行了分析研究.赖远明等^[17]根据传热学与渗流理论导出了带相变的温度场、渗流场耦合问题的控制微分方程,并求解了一寒区隧道渗流时的温度场问题.

总结以上的研究成果,不难看出冻土的宏观力学性质和冻土体的工程性质主要受温度、总含水量、冰裹体的结构、粒度、及其相对于作用力的方向、土中未冻水含量、孔隙与饱和度等因素的影响.

为了进一步了解冻土的破坏机理与蠕变机制,苗天德等人^[18]根据冻土蠕变过程中微结构变化的电镜观测结果,提出了冻土蠕变的微结构损伤理论;用冻土中含冰量、颗粒定向因子及面积损伤因子等表征微结构变化的内变量函数构造了冻土蠕变耗散势;进而提出了冻土蠕变的损伤演化方程,然而目前国内外的微细机理研究都还无法与冻土的宏观力学性质建立确定性的关系.

笔者认为目前的冻土强度研究大都局限在冻结土的范围,而对于寒区工程更为重要的是冻融过程中土体的变形与强度特性,大量的试验表明冻土的强度性质具有从高温下融土摩擦类

材料的强度特性到低温下冻结土的晶格类材料的强度特性的两面性。仅仅对已冻结土的变形与强度性质的研究不仅远不能满足实际工程的需要，而且也不能揭示冻结土的强度与变形特性的变化规律。针对我国冻土力学研究的这种现象，有些专家对我国冻土力学研究中理论指导性不强、系统深入不够、措施针对性不强的现象表示了忧虑。80年代以来，对影响冻土力学性质的根本因素：水、热迁移与相变的微观机理研究在我国开始发展起来。

2 正冻土中的热质迁移理论研究

正冻土中的热质迁移根据其传导机理可分为热质的直接迁移与间接迁移。直接迁移主要是在温度势作用下以热传导方式进行。有两个重要问题至今没能很好解决。一是冻土的复杂的热传导系数的变化规律问题。冻土的土性、组构、相对密度、初始含水量、未冻水含量显然与其热传导系数有直接关系；研究人员正在持续不断地努力寻求一种描述冻土的热传导性质变化机理与范围的综合理论模型来表述冻土的这种多相、多孔介质的热传导性质，以改变传统的分别研究冻土中各独立相物质的热传导性来估算冻土的热传导性的半经验方法；然而大部分已进行的实验均是在远远低于土中水冰点的低温下进行的，无法反映正冻土中水分相变潜热和水分迁移引起的显热变化特性^[19]。

另一个难题是热传导的边界条件影响问题。由于正冻土中热质的迁移直接决定于温度梯度——热边界条件。在室内试验或现场模型试验中，研究对象的热边界条件一般均能较好地确定。然而当研究对象是一实际的工程冻土体时，其真实的边界（如地表）条件常常是非常复杂多变的。不少学者^[20,21]对植被、冰雪等不同覆盖下的地表传热性质进行了研究，可为较准确地选取边界条件提供量化指标；在其它许多复杂条件下，热边界条件还常常需考虑冻土表面之上的冷空气的辐射、湍流等因素。

正冻土中热质的间接迁移主要由正冻土中的水分迁移与水分相变吸、放热引起。而水分的迁移又是在温度势、溶质势、重力势等作用下产生的。因此，热质迁移与水分迁移具有十分明显的耦合机理。Kay等人^[22]将由水分迁移导致的热质迁移统一归纳到一“等效热传导项”中，并且发现对于易冻土在零温附近由于相变潜热引起的热迁移远远大于单纯的热传导引起的热质迁移。

然而Osterkamp^[23]在假定正冻土中没有间接热质迁移的条件下，提出了一个理论模型用以描述含盐冻土中冻结锋面的发展，Cary^[24]提出了一个描述水分、溶质和热质相耦合的间接热传导模型，但没有考虑冻结锋面上溶质的逸出与渗透势引起的水分流动影响。

苗天德等^[25]在混合物理基础上提出了正冻土中水热迁移耦合模型，推导出正冻土中考虑未冻水迁移影响的非线性热传导方程，属非线性的Burgers方程，与经典的Stefan线性热传导方程的明显区别在于，后者无法描述冻结过程中的水热耦合效应。

遗憾的是，由于溶质迁移与电位势引起的水分迁移对热质的间接迁移的影响还未见有研究成果发表。

3 正冻土中的水分迁移理论研究

冻土的力学性质及冻土体的冻胀、融沉性质主要取决于冻土中的水、热质迁移与相变过程。从50年代开始，国际上就开始了土壤反复冻融过程中的水分迁移理论与冻胀机理研究；近年来，对正冻土、已冻土和正融土中的水分迁移和成冰规律予以高度重视^[26]。水分迁移研究主要集中在迁移动力与迁移模型上。

水分的迁移机制也可分为直接迁移与间接（耦合）迁移。直接迁移也就是通常渗流分析中的水头势造成的渗流运动，在大多数土中符合层流假定，可按达西定律描述。间接迁移一般是指由温度梯度、溶质梯度或电位梯度等非水头、孔压间接作用引起的水分迁移。通常认为温度梯

度是正冻土中水分迁移的主要驱动力，一般由基于平衡态热力学原理描述温度与压力之间的相互关系的 Clapeyron 方程来表述

$$V_i p_i + V_w (p_w - \pi) = -H_f \frac{\theta - \theta_0}{\theta_0}$$

式中， V, p 是体积和压力； i, w 分别是冰和水相； θ 是温度； θ_0 是初始温度； H_f 是相变潜热。然而上式是在压力与温度不随时间变化的稳定假定下才适用的。同时，实际有上覆压力的冻土中，要应用上式，必须首先确定冻土体微元中土颗粒、冰粒、水三相之间的荷载分配与相互作用力^[19]。

李述训^[27]进行了系统研究之后，论证了上式不能作为大多数非饱和正冻土在非稳定温度场作用下的水分迁移的理论依据。Iwata^[28]进一步研究了其它正冻土中的土水势作用机理，提出了一个正冻土中水分迁移速度与水头、溶质梯度、电位势梯度相关联的模型。

不难看出，无论冻土中土水势具体以哪种势（如：温度势、溶质势、电位势等）为主，其发生作用时均以水流为载体。

Фельдман^[29]提出的真空抽吸机制认为土壤在冻结或融化过程中，由于冻土中冰融化后体积收缩形成的土壤内局部真空将水分从压力高的未冻区抽吸到正在融化的土层中，随后的冻结又将水分固定到土层内。他同时还否定毛细水向冻结面迁移机制的理论，认为：“毛细机制不可能解释水分向冻结界面的迁移。因为冻结界面不是水-空气的自由界面，也不是弯液面”。对毛细水分在冻结界面是否存在弯液面，不同的研究者持有不同的看法。徐学祖^[26,30]用扫描电镜对冻土颗粒外围未冻水膜形态进行观察发现：高岭矿物及表面能小的多矿物颗粒外围未冻水膜一般为平整外形，蒙脱矿物颗粒外围还可能出现弯曲和弥散型未冻水膜形态。从而说明了毛管水和薄膜水迁移机制的可能性。

王家澄^[31]还检验了真空渗透和溶质浓度梯度引起的渗压机制，指出在真空渗透机制作用下，即使在砂土中也可形成厚冰层。渗压机制进一步说明已冻土中也并不是没有水分迁移与相变，只要其中存在溶质浓度梯度，即使在等温条件下同样可诱发可观的冻胀。

此外，邱国庆^[32]还对粘性土冻胀率（ η_p ）与冻结速度（ V_f ）和优势阴离子在土中的原始含量（ C_0 ）的关系进行了研究。

总之，对正冻土、已冻土和正融土的宏观力学性质的机理研究必须引深到冻土中水热迁移和成冰规律的微、细观研究上；引深到冻土相应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。借助于现代扫描电子显微镜、CT 扫描仪和压汞仪，可系统地研究土、水、热、力和溶质五大要素对土中水成冰过程和冷生组构形成的内在影响规律。可望提出正冻土中土水势的内在力学机制与相应的表述模型。

4 正冻土的水、热、力与变形耦合模型研究

冻土的水、热迁移与成冰过程本质上是多孔多相介质带相变的固、液、气、热耦合问题，目前国内外的研究大多停留在实验探索阶段，理论上的探讨很不成熟^[25]。Aboutit 等人^[33]较早研究了弹性多孔介质中不计水的压缩性和热膨胀性时固液热耦合变分原理；Mctigue^[34]提出了可压缩的固液两相介质具有不同热膨胀性的固液热三场耦合理论，但忽略了介质的热传导性；Noorished 等人^[35]首次提出了饱和裂隙介质（岩体）的固液热耦合方程；Thomas 等人^[36,37]建立了变形非饱和土中热水、水蒸气及空气传输相互作用的复杂理论模型。Gatmiri^[38,39]提出了考虑土体骨架非线性变形的固液热耦合模型，较全面地考虑了固相的变形非线性、液体的可压缩性和热膨胀性及热的传导与对流。

以上的研究均是针对高温下的三场耦合问题，一般都不涉及具有四相（土骨架、冰、水、气）物质和相变过程的冻土。Fremond^[40]对正冻土的热力学性质进行了初步描述；Lunardini^[41]对正

冻土与融土中的热传导进行了系统的分析; Konard^[42] 提出了一个描述正冻土的冰晶形成与水分迁移的模型; Dennis^[43] 对冻结过程进行了深入系统的试验研究; 我国学者徐学祖、李述训、程国栋、苗天德等人先后对冻土的水分迁移与热质转移, 水热力耦合问题进行了较深入的试验与理论研究.

将前人的工作做一归纳与分类^[44], 可将国内外现有的耦合模型分为: 经验与半经验模型、流体动力学模型、刚冰模型和热力学模型五大类.

(1) 流体动力学模型

Harlan (1973)^[45] 首次在非饱和土中水分迁移与非完全冻结土中的水分迁移理论分析的基础上提出了正冻土中热质与水分迁移相互作用的耦合模型; 随后不少学者在这种思路下提出了各种类似的模型 (Sheppard (1978)^[46], Jansson & Halldin (1979)^[47], Fukuda (1982)^[48], Fukuda & Nakagawa (1985)^[49]), 这些模型的一大缺点是无法描述冰透镜体产生的离散性. 冻胀通常发生在含水量增加超过了冻土初始孔压含量的条件下, 冰透镜体往往就在冻土中水分迁移流动量最大的区域产生. Guymon 等人 (1980, 1993)^[50,51] 提出的模型被认为是最先进的, 可求解非塑性土季节性冻融过程问题, 并经过了长期的应用与考验.

(2) 冻胀的刚冰模型

该模型基于次冻胀理论, 认为在冰透镜体底面与冻结锋面之间, 存在着一个低含水量、低导湿率和无冻胀的一个带, 称为冻结缘^[52] (Frozen fringe). 根据这个概念, 可由冰透镜体底面温度计算工程上需要的最大冻胀力. O'Neill^[53] 在孔隙冰与孔隙水之间用一适当的比例系数定义了一个中性应力, 以便于应用太沙基的多孔介质有效应力理论. 根据这个理论, 在有效应力足够承担上覆荷重的冻结缘区内, 新的冰透镜体将由此产生. “刚冰”模型之所以称为“刚冰”, 是因为该模型假定在冻结缘中的冰与正在生长的冰透镜体是刚性连接, 当冻胀发生时, 孔隙冰可通过微观重新冻结作用过程在冻土中迁移.

(3) 热力学模型

热力学模型是 Duquenois^[54] 在 1985 年首次提出, 后经 Fremont 和 Mikkola^[40] 在 1991 年改进发展而成. 模型在冻土微元体中土、冰、水三相介质的质量守恒、能量守恒及熵不等式的理论基础上, 提出了多相介质的相应的自由能和耗散能表达式与多相介质的本构方程. 这个模型可以考虑由于冻胀、水热迁移与水分冻结引起的孔隙吸力. 然而该模型仍在发展之中, 目前尚无法在工程中应用.

以上三大类模型考虑的因素不同, 分析功能与精度各不相同, 见表 1.

表 1 三大类模型的功能与作用对比^[44]

考虑因素	模型求解目标	流体动力学模型	刚冰模型	热力学模型
温度	a 冻结嵌入, b 融化深度	a, b	a, b	a, b
位移	a 冻胀, b 融沉	a, b	a	a, b
含水量与含冰量	a 孔压, b 含水量, c 含冰量	a, b, c	a, b, c	a, b, c
应力与应变	a 应力, b 应变			a, b

然而大多数学者均只对冻土中的水、热耦合或水、热及冻胀力耦合进行了试验与分析, 尚未考虑冻胀变形对水、热传导的耦合影响. 全面考虑冻土中骨架、冰、水三相多孔介质的水、热、力、变形真正的三相耦合的研究尚未见报道.

冻土的冻胀、融沉现象的本质是冻土多孔介质中土骨架、冰晶体、未冻水与空气这四相物质在温度、水头、外压与变形等外界因素作用下的相互运动、迁移、扩散与相变. 目前大都只研究温度与渗流的相互作用而不考虑变形, 它远不足以描述冻胀融沉的内在机制.

笔者^[55] 通过冻土多孔多相微元体的平衡方程, 提出了考虑土骨架与冰颗粒之间相互作用力 (冻胀力) 的冻土介质特殊的有效应力原理, 在多孔固液介质 (包括准饱和时的气相) 的质量守

恒方程, 多孔多相介质的热、能守恒方程的基础上, 建立了全面考虑冻土中骨架、冰、水、气四相介质水、热、力与变形真正的耦合作用的数理方程, 并在引进国外大型岩土工程分析软件的平台, 开发出了饱和与准饱和冻土介质温度场、水分场、变形场三场耦合问题的有限元分析软件, 并应用 Aboustit^[33] 的一维砂土柱热弹性固结问题解析解进行了对比验证. 针对一寒区碎石桩复合地基的工程算例显示了该项研究的广泛应用前景.

5 今后的研究方向思考

综合分析以上冻土力学的发展现状与存在的问题, 笔者认为:

(1) 冻土力学的唯象学上的宏观力学性质研究应该走出低谷, 以探索冻害原因的冻土细观冻胀机制研究为重点, 去适应日新月异的冻土工程的发展;

(2) 冻土力学也应该发展新的学科生长点, 使其能够与兄弟学科: 土力学、岩石力学的飞速发展相协调;

(3) 冻土力学的研究内容应该从对冻结土的宏观强度与变形性质向更切合实际工程需要的正冻土、正融土微、细观热、力学耦合性质方面深化;

(4) 冻土力学的研究思路应该从对土样纯力学量的试验研究向土样结构、级配、含水量、饱和度等土性指标在不同负温下对土样颗粒排列与胶结特性的强度、变形影响机理方面转移;

(5) 冻土力学的研究对象也应该从室内冻结试验的研究向具有各种不同水热交换边界条件与水热迁移内在规律的冻土体发展.

6 结 论

本文从冻土宏观力学性质 (包括实验与应用两个方面)、正冻土中细观水、热迁移理论、正冻土中水、热、力、变形耦合性质三个层次上简要论述了冻土力学在以上三个方面的发展现状与存在的问题, 并指出了我国冻土力学今后的重点研究方向.

无论如何, 冻土力学作为一门科学, 毕竟还很年轻, 而它所研究的对象却是那么的复杂而多变. 从根本上来讲, 冻土力学正面临着人类未曾有过的新挑战, 寒区工程规模、寒区工程应用条件以及气候、环境的新变化, 均给冻土力学提出了一系列亟待解决的新课题. 冻土力学必须在处理问题条件上提高它的实用性, 以面对因素多、环境差、条件苛、要求高的工程实际^[56], 做出准确可靠的决策; 冻土力学还必须在理论体系上提高它的完整性, 以建立一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, 反映和区别对待不同因素之间的相互作用和内在联系; 最后, 冻土力学必须在测试、计算上进一步提高它的精确性, 开拓它的计算机仿真分析功能与应用条件, 以揭示和利用更加真实的冻土力学规律, 为进一步提高寒区工程的耐久性, 消减人力、物力、财力的大量浪费而发挥它应尽的责任.

参 考 文 献

- 1 崔托维奇 H A. 冻土力学. 张长庆, 朱元林译. 北京: 科学出版社, 1985
- 2 马巍, 吴紫汪. 围压作用下冻结砂土微结构变化的电镜分析. 冰川冻土, 1995, 17(2): 152~157
- 3 吴紫汪, 马巍. 冻土强度与蠕变. 兰州: 兰州大学出版社, 1994
- 4 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. 冰川冻土, 1995, 17(supp): 20~25
- 5 何平, 朱元林等. 饱和冻结粉土的动弹模及动强度. 冰川冻土, 1993, 15(1): 170~174
- 6 何平, 张家懿等. 振动频率对冻土破坏之影响. 岩土工程学报, 1995, 17(3): 78~81
- 7 李洪升, 张小鹏, 朱元林等. 冻土断裂韧度 K_{Ic} 的测试研究. 冰川冻土, 1995a, 17(4): 328~333
- 8 盛煜, 吴紫汪, 朱元林等. 应用蠕变理论对冻土在增应力过程中蠕变规律的几何分析. 冰川冻土, 1995, 17(supp): 47~53
- 9 俞祁浩, 朱元林, 张健明. 冻土冲击试验的尺寸效应. 见: 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. 756~760

- 10 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. 见: 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
- 11 朱林楠, 吴紫汪, 臧恩穆. 冻土退化与道路工程. 见: 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. 333~340
- 12 李东庆. 青海省 214 国道(青康公路)多年冻土退化与路基稳定性分析研究. 中国科学院兰州冰川冻土研究所博士学位论文. 1999
- 13 令锋. 冻土路基热状况动态特征的数值模拟与预报研究. 中国科学院兰州冰川冻土研究所博士学位论文. 1999
- 14 李安国. 渠道设计冻深的确定. 见: 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, 1996a. 325~332
- 15 刘鸿绪. 建筑基础的冻胀力. 见: 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. 877~892
- 16 丁靖康, 娄安全. 多年冻土区挡土建筑物的设计与计算. 见: 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, 1127~1137
- 17 赖远明, 吴紫汪, 朱元林等. 寒区隧道温度场和渗流场耦合问题的非线性分析. 中国科学, D 辑, 1999, (增刊 1): 21~27
- 18 苗天德, 魏雪霞等. 冻土蠕变过程的微结构损伤理论. 中国科学(B 辑), 1995, 25(3): 309~317
- 19 Kay B D, Perfect E. State of the art: Heat and mass transfer in freezing soils. In: Proc of 5th international Symposium on ground freezing. 1988. 3~21
- 20 Goodrich L E. The influence of snow cover on the ground thermal regime. *Canadian Geotechnical Journal*, 1982, 19: 421~432
- 21 Benoit G R, Mostaghimi S. Modeling soil frost under three tillage system. *Transactions of the ASAE*, 1985, 28: 1499~1505
- 22 Kay B D, Fukuda M, et al. The importance of water migration in the measurements of the thermal conductivity of unsaturated frozen soils. *Cold Region Sci and Tech*, 1981, 5: 95~106
- 23 Osterkamp T E. Freezing and thawing of the soils and permafrost containing unfrozen water or brine. *Water Resources Res*, 1987, 23: 2279~2285
- 24 Cary J W. A new method for calculating frost heave including solute effects. *Water Resources Res*, 1987, 23: 1620~1624
- 25 苗天德, 郭力, 牛永红, 张长庆等. 正冻土中水热迁移问题的混合物理论模型. 中国科学, D 辑, 1999, 29(supp): 8~14
- 26 徐学祖, 邓友生. 冻土中水分迁移的实验研究. 北京: 科学出版社, 1991. 23
- 27 李述训, 程国栋. 冻融土中的水热输运问题. 兰州: 兰州大学出版社, 1995. 112~118
- 28 Iwata S. Driving force for water migration in frozen clayed soil. *Soil Science and Plant Nutrition*, 1980, 26: 215~227
- 29 Фельдман Г М. Передвижение влаги в талых и промерзающих грунтах. *Издательство Наука*, 1988
- 30 徐学祖, 王家进, 张立新等. 我国冻土物理学近十年研究进展. 见: 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, 1996b. 946~955
- 31 王家澄, 程国栋等. 饱水砂土反复冻融时成冰条件的实验研究. 冰川冻土, 1992, 14(2): 101~106
- 32 邱国庆, E 张伯伦, I 伊斯坎达. 莫岭砂土冻结过程中的离子迁移、水分迁移和冻胀. 冰川冻土, 1986, 8(1): 1~13
- 33 Aboustit B L, Advani S H, Lee J K, Sandhu R S. Finite element evaluation of thermo-elastic consolidation. In: Proc US Symp Rock Mech, 1998. 23rd, 587~595
- 34 Mctigue D E. Thermoelastic response of fluid saturated porous rock. *J Geo Phy Res*, 1986, 91(B9): 9533~9542
- 35 Noorished J, Tsang C F, Witherspoon P A. Coupled Thermal-hydraulic-mechanical phenomena in saturated fractured porous rocks: numerical approach. *J Geophy Res*, 1984, 89(B12): 10365~10373
- 36 Thomas H R, King S D. Coupled Temperature/capillary potential variations in unsaturated soil. *J Eng Mech, ASCE*, 1991, 117(11): 2475~2491
- 37 Thomas H R, He Y. Analysis of coupled heat, moisture and air transfer in a deformable unsaturated soil. *Geotechnique*, 1995, 45(4): 677~689
- 38 Gatmiri B. Fully coupled thermal-hydraulic-mechanical behavior of saturated porous media (soils and fractured rocks), new formulation and numerical approach. Final Report CERMES-EDF, 1995
- 39 Gatmiri B, Delage P. A new formulation of fully coupled thermal- hydro-mechanical behavior of saturated porous media -numerical approach. *Int J Numer Anal Methods Geomech*, accepted for publication 1997, 21(3): 199~225
- 40 Fremont M, Mikkola M. Thermomechanical of freezing soil. In: Yu Xiang, Wang Changsheng eds. Proceedings of the Sixth International Symposium on Ground Freezing. Vol.1. Rottendam: A. A. Balkema, 1991
- 41 Lunardini V J. Heat Transfer with Freezing and Thawing. Elsevier: Amsterdam-Oxford-New York-Tokeo, 1991
- 42 Konard J M, Duquennoi C. A model for water transport and ice lensing in freezing soils. *Water Resources Research*, 1993, 29(9): 3109~3124
- 43 Dennis E Pufahl. Frost Action (Section 3 of Roads and Airfields in Cold Regions. Edited by Teds Vinson). *ASCE*, 1996, 51~85
- 44 Kujala K. Estimation of frost heave and thaw weakening by statistical analysis and physical models. In: Knutsson ed. Groung Freezing 97. Balkema, Rotterdam, 1997. 31~41
- 45 Harlan R L. Analysis of coupled heat-fluid transport in partially frozen soil. *Water Resources Res*, 1973, 9: 1314~1323

- 46 Sheppard M, Kay B, Loch J. Development and testing of a computer model for heat and mass flow in freezing soils. In: Proceedings Volume 1. 3rd International Conference on Permafrost, Edmonton, Alberta, Canada, 1978. 76~81
- 47 Jansson P-E, Halldin S. Model for the annual water and energy flow in a layered soil. In: Halldin S ed. Comparison of Frost and Energy Exchange Models. Society for Ecological Modelling Copenhagen, 1979. 145~163
- 48 Fukuda M. Experimental studies of coupled heat and moisture transfer in soils during freezing. Contribution no. 2528 from the Institute of Low Temperature Science, Hokkaido University, Sapporo, Japan. 1982. 35~91
- 49 Fukuda M, Nakagawa S. Numerical analysis of frost heaving based upon the coupled heat and water flow model. 4th International Symposium on Ground Freezing. 5~7 August 1985, Sapporo, Japan, 1985. 109~117
- 50 Guymon G, Berg R, Hromadka T. A one-dimensional frost heave model based upon simulation of simultaneous heat and water flux. *Cold Regions Science and Technology*, 1980, 3(2-3): 253~263
- 51 Guymon G, Berg R, Hromadka T. Mathematical model of frost heave and thaw settlement in pavements. CRREL Report 93-2, April 1993
- 52 O'Neill K, Miller R D. Exploration of a rigid ice model of frost heave. *Water Resources Research*, 1985, 21(3): 281~296
- 53 O'Neill K, Miller R D. Numerical solutions for a rigid-ice model of secondary frost heave. U S Army Cold Reg Res Engg Lab Rep, 82-13. Hanover, NH, 1982. 11
- 54 Duquennoi C, Fremond M, Levy M. Modelling of thermal soil behaviour. VTT Symposium 95. 1989. 895~915
- 55 李宁, 陈波, 党发宁. 裂隙岩体介质渗流、变形、温度场耦合分析. *自然科学进展*, 2000, 10(8)
- 56 谢定义. 21世纪土力学的思考. *岩土工程学报*, 1997, 19(4): 111~115

THE ADVANCE AND REVIEW ON FROZEN SOIL MECHANICS*

Li Ning¹ Cheng Guodong Xu Xuezu Zhu Yuanlin

State Key Lab. of Frozen Soil Eng., Cold and Arid Regions Environmental and Engineering Research Institute,
CAS, Lanzhou 730000

¹Xi'an University of Technology, Xi'an 710048

Abstract The recent advances in frozen soil mechanics are demonstrated and discussed from four aspects: (1) Test studies on the mechanical properties of the frozen soil; (2) Heat conductivity properties of the mixture materials of the freezing soil; (3) Water migration behaviors in the freezing soil; and (4) The Heat-Moisture-Deformation Coupling Models. A discussion on above four areas is made for further researches, and suggestions are offered as follows: (a) The research should be transferred from the deformation and strength properties of the frozen soil to the heat and moisture migration behaviors of the freezing and thawing soil, which is often important in engineering. (b) More attentions should be paid to the field tests with complex water and heat boundaries, instead of the lab tests with very simple boundaries. (c) The structure and grade size distribution of the frozen soil should be considered in the further test studies.

Keywords frozen soil mechanics, moisture and heat migration, heat-moisture-deformation coupling model, freezing soil, thawing soil

* The project supported by the National Natural Science Foundation of China (19772093) and Dean's Foundation of CAS.