

第一章

绪 论

国内外对冻土的研究虽有近百年的历史，但在多年冻土地区，尤其是在高原多年冻土地区大面积修筑沥青路面至今尚无先例 即使在多年冻土分布面积较广的俄、美、加等国 也基本上还处于试验研究阶段。

我国在公路建设中，第一次遇到高原多年冻土是在 1954 年修建青康公路时。由于当时缺乏这方面的工程技术措施 造成多年冻土大面积暴露融化 后经改移路线 保护原有植被 运料填筑路基，问题才得以基本解决。

1956 年在青藏公路改建工程中，又多处发现冻土，限于当时仍缺乏有效的处理措施，导致了以后年代的许多工程隐患。

青藏公路格尔木至拉萨段长约 1150km 其中有 700 多 km 路段穿过生态环境恶劣、地质条件复杂的高原多年冻土地区。这里海拔高（公路通过处 4500 ~ 5000m）空气含氧量低（仅为内地 50%左右）冰冻期长（一年约 8 个月 年平均气温在 -2°C ~ -6°C 左右）施工期短（一年仅有 150d 左右）且雨、雪、冰雹不断 加之特有的冻土工程地质条件——地下冰、冰椎、冰丘及热融湖塘遍布，要在这样的地区修建一条铺有沥青路面的二级公路，面对国内外无资料可供借鉴的困境，难度可想而知。

在这种困难条件下，为了确保改建工程质量，交通部决定成立青藏公路科研组，对多年冻土地区有关道路工程技术方面的问题进行研究。

科研组前后分三期开展工作：

第一期科研组由交通部科学研究院及交通部第一公路勘察设计院共同主持，交通部科学研究院重庆分院，青海、西藏交通科学研究所及基建工程兵 851 部队参加 确定了以路基、路面为主要课题的研究任务，即高原多年冻土地区铺筑沥青路面路基稳定性的研究。这一期研究工作自 1973 年起至 1977 年外业工作结束，先后在多年冻土腹部地段修建了试验路 2680m 观测场两处 并通过大量的钻探调查及定点观测工作 及时完成科研工作 于 1977 年 9 月在西宁召开了课题总结会，1978 年提交了研究总结报告及应用文件。

第二期青藏公路科研组由交通部第一公路勘察设计院主持，青海省交通局与基建工程兵 851 部队参加，同时邀请中科院兰州冰川冻土研究所、铁道部科学研究院西北研究所、西安公路学院、交通部公路科学研究所和重庆公路科学研究所协作，确定了以下几个主要课题：

- (1) 青藏公路地下冰分布规律的研究；
- (2) 沥青路面下路基稳定性的研究；
- (3) 沥青路面结构选型及其修筑的研究；

(4) 桥涵基础的研究。

第二期科研组先后有 187 人次参加 自 1979 ~ 1984 年经过 6 年的努力 完成了课题研究计划, 满足了青藏公路沥青路面改建工程的需要, 也为高原多年冻土地区的公路工程建设提供了必要的依据和资料

该研究课题于 1985 年 11 月由交通部公路局组织了鉴定, 鉴定委员会认为:

(1) 在路基稳定性研究中, 根据我国的具体条件, 将就地取材、提高路基作为保护冻土的基本措施。为此, 扩建了五道梁、可可西里两个较长期的观测场, 对多年冻土地区已竣工的 300 多 km 沥青路面进行了大量钻探、调查 并选定了 20 余段代表路段埋设了地温、变形观测仪器设备 进行了 3 ~ 6 年的观测。根据观测资料的分析提出了多年冻土地区路基变形发展阶段及特征, 提出了估算沉降量的办法和防止、控制变形量的主要措施。

(2) 路面研究是在大量室内试验的基础上先后在不同路段修建了 3 种面层、5 种基层 (总计 4.0km 的试验路面 并分别进行了 4 ~ 6 年的观测测定以及多年的工程实践, 论证性地提出了适用于高原多年冻土地区不同地带的 9 种较经济合理的路面结构组合和部分计算参数。其中, 首次在我国使用无规聚丙烯砾石混合料面层, 对无规聚丙烯及其混合料的各种物理、化学性能同沥青材料及沥青混合料进行了室内对比试验并修筑对比试验路段, 论证并肯定了该种材料的路用性能以及用于保护冻土良好效果和显著的经济效益。

(3) 在昆仑山桩基试验场, 完成了勘测、设计, 各种测试元件的加工制作与桩基施工, 进行了 12 根钢筋混凝土桩 等截面、变截面插入桩、灌注桩 的垂直和水平静载和 2 根钢管桩的水平静载试验, 确定了承载力。对竖向冻结力和横向土抗力的影响因素与分布形式, 进行了较为深入的研究 确定了地温对桩承载力的影响规律。对各类桩型的施工方法、回冻过程、冻胀、盐渍化冻土的冻结强度, 低温、早强、耐久混凝土和高寒地区测试元件的制作等方面进行了有益的探索, 对多年冻土地区的桩基设计提出了建议。

该项研究成果《青藏公路多年冻土地区黑色路面的修筑技术》和《青藏公路多年冻土地区路基路面试验研究》分别获得 1987 年度国家科技进步一等奖和交通部科技进步一等奖。

第三期科研组 先后有 240 人次参加。自 1985 年至 1999 年经过 10 多年的努力 完成了课题研究计划, 满足了青藏公路整治工程的需要, 也为高原多年冻土地区的公路工程建设提供了可靠依据和宝贵资料。第三期科研成果获 2002 年陕西省科技进步二等奖, 其主要成果为:

(1) 根据青藏公路沥青路面强烈的吸热封水作用, 多年冻土区路基下人为上限逐年下降, 造成冻土在垂向上呈不衔接状或局部冻土消失, 加剧了路基不均匀沉陷, 导致路基路面过早破坏的状况, 提出了在青藏公路整治工程中应根据不同的冻土条件, 分别采用保护冻土、控制融化速率和综合治理的设计原则。

(2) 根据对青藏公路 12 个不同类型冻土路段 经过 5 ~ 8 年的路基变形、地温观测和全路段路况调查资料, 结合青藏公路整治工程设计, 提出了多年冻土地区高温冻土区路基设计容许变形控制指标, 并根据不同的冻土类型, 给出了上限下降允许值和相应的路基临界高度计算公式。

(3) 根据对青藏公路多年冻土地区涵洞使用状况的调查及对具有代表性涵洞的长期观测, 分析了青藏公路多年冻土地区涵洞病害的主要原因。从设计、施工和养护的不同角度, 提出了适用于多年冻土地区涵洞的结构类型、基础埋置深度以及防治涵洞病害的原则和工程措施。

(4)根据青藏公路多年冻土地区工程状况,冻土地质条件和地温、融沉观测资料,直接从冻融界面的热物理过程入手,借助地温梯度计算预测一定时期内多年冻土可能融化的最大深度。

(5)根据热桩在多年冻土地区试验涵洞工程中的应用状况,提出了采用热桩技术处治多年冻土局部道路或构造物冻害的设计方法和应用特性,为多年冻土地区防治工程冻害提出了新的方法和宝贵经验。

(6)通过对聚苯乙烯隔热层路基试验路的设计、施工和竣工后3年多的观测,分析了在多年冻土地区路基填高受到限制时采用隔热层路基的可行性与合理性,提出了隔热层合理埋设深度的计算方法和设计、施工注意要点,为在多年冻土地区推广应用该结构保护冻土提供了宝贵经验。

(7)通过对钢纤维水泥混凝土路面试验路的设计、施工和竣工后3年多的观测,提出了设计高强度钢纤维水泥混凝土配比设计的新方法,改进了粗集料级配,降低了含砂率,使每立方米混凝土节约水泥14%左右;分析了钢纤维水泥混凝土路面早期裂缝的成因和应采取的改进措施,提出了在多年冻土地区钢纤维水泥混凝土路面合理板块长度及切缝时间,为今后在多年冻土地区应用该类结构提供了可贵经验。

青藏公路承担着85%以上进出藏客运及90%以上进出藏物资的运输任务,公路状况的好坏直接关系到西藏经济繁荣与社会稳定。青藏公路三期科研成果为1973~1985年的二次改建及1992~1996年、1996~1999年二期整治大修提供了技术支持,并取得明显成效。青藏公路行车速度由整治工程前的20~30km/h提高到整治工程后的50~60km/h,小车在16~17h内即可从格尔木到达拉萨完成1150km的行程。

青藏公路三期科研历时之长,投入力量之多,所获成果之丰富,在我国公路交通史上均是绝无仅有的,不仅创造了高原多年冻土区筑路奇迹,也为我国培养和造就了一批公路冻土工程设计研究的中坚力量。目前,青藏公路科研成果已在青藏公路、青康公路改建和青藏铁路建设中得到推广应用,在青藏公路科研中成长起来的专业技术人员也正在交通部西部科技项目中承担着多年冻土区公路修筑技术更进一步的研究重任。

第二章

多年冻土与冻土工程

第一节 多年冻土分布

冻土,一般指温度在 0°C 或 0 以下,并含有冰的各种岩类和土壤。通常按土处于冻结状态的持续时间来划分冻土。冻结状态的持续时间从几小时到几昼夜者为短期冻土;不到一年者为季节冻土;两年及以上者为多年冻土。冻土是由各种成分组成的非常复杂的天然多相地层,含有矿物颗粒、固、液态水以及气体等。

我国位于欧亚大陆的东南部,就陆地(包括海南岛,不包括其他岛屿)而言,从北向南大致穿越了35个纬度(北纬 $53^{\circ}\sim 18^{\circ}$)、东西相隔61个经度(东经 $135^{\circ}\sim 74^{\circ}$)。我国的地势西部高、东部低,辽阔的疆域和复杂的地形,使我国的冻土独具特色。我国冻土分布状况如图2-1所示。

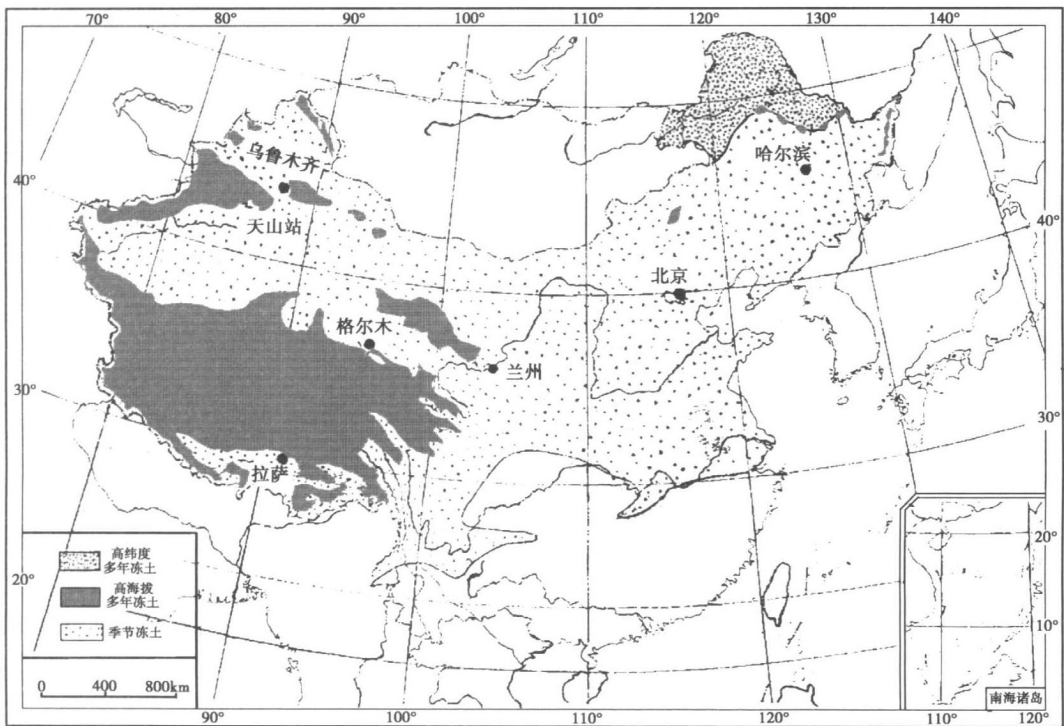


图 2-1 中国冻土分布示意图

地球上多年冻土的分布面积约占陆地面积的 23% 主要分布在俄罗斯、加拿大、中国 and 美国的阿拉斯加等地，其中我国的多年冻土分布面积约 $215 \times 10^4 \text{km}^2$ ，仅次于俄罗斯 $1000 \times 10^4 \text{km}^2$ 和加拿大 $(390 \times 10^4 \sim 490 \times 10^4 \text{km}^2)$ ，约为美国多年冻土面积 $140 \times 10^4 \text{km}^2$ 的 1.5 倍。由此可见，我国是世界上第三冻土大国，约占世界多年冻土分布面积的 10% 占我国国土面积的 21.5% 左右，主要分布在东北大、小兴安岭、西部高山和青藏高原等地。中国东北的多年冻土位于欧亚大陆高纬度多年冻土区的南缘，最南端达北纬 46.5° 青藏高原的多年冻土位于高纬度多年冻土南界以南 属高海拔多年冻土 是世界上中、低纬度地带海拔最高 面积最大的多年冻土区 面积约 $149 \times 10^4 \text{km}^2$ 占中国多年冻土总面积的 70%。

一、东北多年冻土

东北高纬度带多年冻土主要分布在大、小兴安岭和松嫩平原北部，面积约 $39 \times 10^4 \text{km}^2$ 介于北纬 $46^\circ 30'$ 与北纬 $53^\circ 30'$ 之间 海拔几百米至 1000m 上下。涵盖大兴安岭北部和中部的针叶林区、小兴安岭的针阔混交林区、松嫩平原森林草原区北部及蒙古高原（呼伦贝尔—锡林郭勒高原）干草原、荒漠草原区北部。气候上属我国最寒冷的寒温带和中温带的北部。太阳总辐射和辐射平衡的分布大致与纬线相等，降水由沿海向内陆递减。

自南向北或由东南至西北，高纬度多年冻土分布及其特征具有明显的纬度地带性规律。依上述方向 多年冻土面积由 5% ~ 20% 增加到 70% ~ 80% 冻土温度由 $0^\circ\text{C} \sim -1.0^\circ\text{C}$ 下降到 $-1.0^\circ\text{C} \sim -2.0^\circ\text{C}$ 最低为 -4.2°C 冻土厚度由 5 ~ 20m 增厚到 60 ~ 80m 乃至超过 100m；多年冻土类型由零星岛状多年冻土过渡为岛状融区多年冻土、大块连续多年冻土。由于地貌、冬季逆温、植被、松散层厚度差异等自然的影响 使多年冻土分布、形成、发育的上述纬度地带性规律受到一定干扰，使其在纬度地带背景上又展现出区域性或地段性差异。

在大块连续多年冻土地区，虽然多年冻土在水平及垂直方向上大体是连续的，但在不同地貌部位冻土分布及发育状况差异甚大。在苔藓发育、松散层较厚的山间谷底、沼泽洼地、低级阶地 多年冻土非常发育 冻土厚度可达 60 ~ 80m 个别地段大于 100m；相反 在树木稀少、松散层较薄的阳坡及半阳坡，一般冻土发育较差或者存在融区，冻土厚度一般小于 20m 阴坡及半阴坡冻土发育状况介于上述二者之间。

在岛状多年冻土分布区，区域自然条件不同，冻土分布及特征亦有差别。在呼伦贝尔高平原上，冻土岛多存在于湖沼湿地边缘，冻土面积不超过总面积的 10% 冻土厚度为 3 ~ 5m 至 10 ~ 15m；在大兴安岭南部的东、西丘陵地带，冻土岛仅沿河漫滩、低级阶地呈断续条带状分布，冻土岛大小自南向北增大，冻土面积由 10% 增到 30% 左右 在小兴安岭山地 冻土岛只分布于植被茂密及沼泽地的山间谷底或河漫滩，其面积为 20% 左右。

尽管不同地貌部位冻土分布及发育状况差别很大，但是不论是北部或是南部，冻土分布及发育都有一共同特点：即低处冻土厚度较大、温度较低。这一特点对冻土退化过程亦有制约作用。冻土退化程序是 先阳坡 后阴坡 先高处 后低处 先山上 后谷底。多年冻土分布情况见表 2-1。

二、高山多年冻土

高山多年冻土主要分布在西部内陆如阿尔泰山、天山、祁连山等山系一定的海拔高度以上

东北多年冻土的分布特征

表 2-1

多年冻土区	年平均气温 ($^{\circ}\text{C}$)	年平均地温 ($^{\circ}\text{C}$)	多年冻土所 占面积(%)	多年冻土厚度 (m)
多年分布 (或断续分布)	< -5	$-4 \sim 0$	70 ~ 80	50 ~ 100
大片—岛状分布	$-3 \sim -5$	$-1.5 \sim 2$	30 ~ 70	20 ~ 50
岛状和稀疏岛状 及零星分布	$0 \sim -3$	$-1 \sim 3$	5 ~ 30	

位置，岛状冻土出现的最低海拔高度的连线即为多年冻土分布下界。由下界随海拔高度上升，冻土分布的连续性增大，由岛状至大片连续分布过渡，冻土温度随之降低，厚度随之增大，具有明显的垂直分布性。各山系气候、地理、地质条件不同，多年冻土分布的下界亦不相同。

阿尔泰山横亘于中、俄、蒙三国边境。我国阿尔泰山属该山脉的中段和西段，山脊从东南向西北升高，海拔高度一般 1000 ~ 3500m，最高峰友谊峰 4374m。山麓地带冬季负温期 5 ~ 6 个月，中、高山地带长达 7 ~ 8 个月。绝对最低气温可达 -50°C 。由于受北冰洋气团的影响，降水丰富，并随高度升高降水量增大，低山区 300 ~ 400mm，中山带 500 ~ 600mm，高山带 800 ~ 900mm。冬季降雪时，低、中、高山带积雪厚度超过 2m，稳定积雪期一般 6 ~ 7 个月。阿尔泰山多年冻土区位于高纬度欧亚大陆多年冻土南界附近，因受海拔高度的影响，南界一直延伸到北纬 46° 以南，属高纬度山地多年冻土，分布面积约 $1.1 \times 10^4 \text{km}^2$ 。其下界海拔 2200m，2200 ~ 2800m 是岛状多年冻土带，年平均气温为 $-5.4^{\circ}\text{C} \sim -6.7^{\circ}\text{C}$ 。2800m 以上是大片连续多年冻土带，年平均气温 $-9.4^{\circ}\text{C} \sim -11.5^{\circ}\text{C}$ ，多年冻土厚度由数米增至 400m。

在我国境内，天山自西向东延伸 1700km，跨越 21 个经度（东经 $74^{\circ} \sim 95^{\circ}$ ），南北宽 100 ~ 400km，跨越 1 ~ 5 个纬度（约在北纬 $40^{\circ} \sim 45^{\circ}$ 之间），主要的山脊线一般都在海拔 4000m 以上，最高峰为西部的托木尔峰 7443.8m）。气温随高度的增大而剧烈下降，在海拔 3000m 左右，年平均气温约为 -2.0°C ，而在海拔 4000 ~ 4500m 的山脊，年平均气温可达 $-8^{\circ}\text{C} \sim -12^{\circ}\text{C}$ ；3000m 以上负温季节长达 7 ~ 8 个月。雪线附近，年降水量达 500 ~ 700mm，甚至 1000mm 以上，以固态降水为主，年降水量的 70% ~ 90% 以上都集中在 4 ~ 9 月。多年冻土分布总面积为 $6.3 \times 10^4 \text{km}^2$ 。高度是冻土分布的主导因素，下界最低海拔，阴坡为 2700m，阳坡为 3100m，天山坡向对冻土分布的影响比青藏高原和祁连山显著。据初步统计，阴坡多年冻土下界一般比阳坡低 300 ~ 400m，纬度增加 1° ，多年冻土下界下降 171.2m；经度增加 1° ，多年冻土下界下降 10.6m。在多年冻土下界附近，冻土温度较高（ $-0.1^{\circ}\text{C} \sim -0.2^{\circ}\text{C}$ ），冻土厚度不足 20m，具有很大的不稳定性。在一定海拔以上，出现年平均地温低于 -2°C 的厚达 100m 或更大的稳定型多年冻土。

祁连山位处青藏高原北缘，西南部为柴达木盆地。祁连山多年冻土分布下界南侧大致为 3700 ~ 3900m，北侧为 3500 ~ 3650m，北侧下界较南侧低 206 ~ 250m，东段下界较西段 150 ~ 200m，多年冻土分布面积 $9.5 \times 10^4 \text{km}^2$ ，多年冻土温度 $-0.1^{\circ}\text{C} \sim 2.3^{\circ}\text{C}$ ，多年冻土厚度由数米至 140m。

三、高原多年冻土

青藏高原多年冻土可明显地分出 3 个条带：昆仑山北坡至唐古拉山南麓（即藏北高原大部分）多年冻土在平原上呈连续分布；扎加藏布江河谷两侧呈大片连续分布；雅鲁藏布江河谷往南至喜马拉雅山呈零星分布。青藏高原是耸立于中低纬度的巨大隆起，其海拔高（平均 4000m 以上）、气候严寒的特点决定着高原冻土的存在和广泛分布。青藏高原多年冻土区是世界中、低纬度地带海拔最高、面积最大的冻土区。青藏高原地势总的趋势是西北高、东南低；气候特点是西北部寒冷干旱、东南部温暖湿润。自然地带分异是“以羌塘高原北部和昆仑山为中心，向周围地区倾斜散开”。这里是多年冻土最发育的地区，基本呈连续或大片分布，温度低，地下冰厚。青藏高原南北跨越 12 个纬度，东西横亘近 30 个经度，纬度地带性和经向水平分异同时影响到冻土分布特征和区域差异。

青藏公路格尔木至拉萨 1150km，自北而南纵贯青藏高原腹地，沿线多年工程勘察揭示，青藏公路穿越青藏高原的大片连续多年冻土、岛状多年冻土和季节冻土区。沿线的多年冻土具有强烈的垂直地带性，多年冻土温度、厚度受海拔高度的控制，海拔越高，温度越低，多年冻土就越厚。青藏公路沿线多年冻土基本呈大面积连续分布，发育在各种地形地貌单元的松散和半坚硬岩层中。公路沿线多年冻土分布主要有岛状不连续多年冻土和大片连续多年冻土两种类型。从西大滩 K2879 开始进入岛状多年冻土区，海拔高程为 4150m，年平均气温为 $-2.5^{\circ}\text{C} \sim -3.6^{\circ}\text{C}$ ，于昆仑山口 K2886 进入大片连续多年冻土区，海拔高程为 4350m，年平均气温为 $-3.6^{\circ}\text{C} \sim -5.6^{\circ}\text{C}$ ，到唐古拉山以南头二九山区的 K3415 大片连续多年冻土分布终止，海拔高程为 4800m；K3415 ~ K3512 为岛状多年冻土区。表 2-2 为青藏公路沿线多年冻土的基本分布情况。

青藏公路沿线 (K2879 ~ K3630) 多年冻土分布特征表 2-2

路 段	大片连续多年冻土	岛状多年冻土	多年冻土中融区	季节冻土
累计长度 (km)	422.6	97	177.4	127

昆仑山区、楚玛尔河高原、可可西里及风火山等地区主要以大片连续多年冻土分布为主，由于受热侵蚀和构造影响，在不冻泉地段 K2914 ~ K2919 前后出现约为 4 ~ 5km 的贯穿性融区。楚玛尔河、北麓河等地段受河流影响，形成范围较小的非贯穿河流融区。沱沱河断陷盆地，由于受河流贯穿融区和渗透辐射融区的影响，出现多年冻土和融区相间分布的格局，平面上和深度上均呈现不连续性。开心岭山区，属于片状多年冻土分布区。通天河盆地、布曲河谷地到温泉断陷谷地，出现青藏公路沿线多年冻土区中最长与范围较大的贯穿性河流融区与多年冻土相间分布区段。在地质构造影响下，温泉断陷谷地存在着较大范围的构造——地表水融区，使得大片连续分布的多年冻土在平面和深度上出现不连续性。唐古拉山区至头二九山区，多年冻土仍呈现大片连续分布。受河流及构造影响，在捷布曲河断陷谷地，具有贯穿融区与多年冻土相间分布的特点。约在 K3415 附近为片状连续的多年冻土分布南界，此后为岛状不连续多年冻土分布区。

青藏高原地势高耸，气候严寒，属高寒大陆性气候。高原腹地气候多变，雨、雪、冰雹四季皆可出现。青藏公路沿线多年平均气温 $-2^{\circ}\text{C} \sim -7^{\circ}\text{C}$ ，多年平均最低气温为 $-14.5^{\circ}\text{C} \sim -17.4^{\circ}\text{C}$ ，最高气温为 $6.8^{\circ}\text{C} \sim 8.1^{\circ}\text{C}$ ，温差为 $23^{\circ}\text{C} \sim 26^{\circ}\text{C}$ 。根据青藏公路多年冻土区近期气象观测资料，年平均温度为 $-4.0^{\circ}\text{C} \sim -6.9^{\circ}\text{C}$ ，全年冻结期达 7 ~ 8 个月。

在纬度、海拔、地形地貌、坡向及其他地理因素的影响下，青藏公路多年冻土厚度分布极不均匀。随着海拔高度的升高多年冻土厚度相应增大，一般来说平均海拔每升高 100m 冻土厚度大致增加 20m 左右。依目前实测资料得知，青藏高原海拔 4000~5000m 范围内最大冻土层厚度为 100m 左右（估计 5000m 以上地区的冻土层厚度将会更大）。青藏公路沿线多年冻土厚度在不同程度上受纬度、坡向及其他地理因素的影响，如风火山东大沟：西南坡冻土厚度分别为 72.8m、71.0m 沟底冻土厚度为 94m 而东北坡冻土厚度分别为 122m、137m、146m。由此可见坡向对局部地区的冻土厚度有很大的影响和控制作用，同时坡向对冻土的作用随纬度的升高而增强。

由于青藏高原山地、盆地、谷地、高平原相间的地貌格局及各地理区域地质、地理条件组合不同，使后期多年冻土的发生、发展形成明显的地域差别。在同一气候波动下，山地因其海拔高于盆地、谷地、高平原而具有温度更低的气候环境，再加上地势高耸有利于热量散失，以及基岩裸露具有较大导热率等原因，因此形成的多年冻土温度较低，厚度较大。高平原、盆地、谷地由于地势较低，气温相对较高，加上形成时间较晚，以及地表水、地下水影响等，故而高平原、盆地、谷地形成了温度高、厚度薄的多年冻土层。

第二节 多年冻土工程特性

多年冻土与自然界中其他岩土相比，因其温度和含冰特性而具有特殊的工程性质。在外部荷载（如路基填土）作用下，由于土体中水分在冻结过程中的重分布伴随着压力产生，使土粒结构、密度发生变化形成冻胀。当冻土融化时，在自重和外荷载作用下产生排水固结，土层压缩变形造成沉降。多年冻土区随着气候冷暖变化，路基及地基土产生周期性冻、融变形，这种变形由于受多重因素影响，特别是冰水作用，其发生、发展过程均与季节冻土地区不同。

一、融沉特性

冻土融化过程中，在自重压密作用下会不断地产生排水固结下沉，即冻土的融沉性。融沉过程中，不仅冻土中冰转变为水时，相变体积会缩小，还会产生孔隙水的消散与排泄。由融沉特性引起的构筑物下沉是冻土区工程的主要病害表现形式。

冻土的融沉性与冻土的粒度成分、含冰量、密度、孔隙水的消散条件等有密切关系。大量的现场与室内试验结果表明：不论何种土质，在允许自由排水条件下，冻土融沉系数随冻土含水量的增加而急剧地增加，而且随着冻土干密度的增大而减小；在相同的含水状况下，冻结粉质亚粘土、粉质粘土的融沉性最强，重粘土和细砂次之，砾石土最小。对于粗粒土来说，土中粉粘粒含量小于或等于 12% 时，融沉性一般变化不大，其值均小于 3%~4%。当粉粘粒含量大于 12% 时，融沉性则随粉粘粒含量的增加而急剧增大。

冻土融化后，在附加荷载压密作用下，土体体积继续产生压缩，并伴随着孔隙水的消散和排泄。冻土路基下的融化夹层，在这种排水固结条件下，土体压缩下沉往往非常缓慢，滞后过程很长。所以，青藏公路路基下沉表现出明显的滞后现象，多数在 3 年后才产生较大的变形。

融化夹层的存在实质上意味着在路基下存在着一层软弱结构，这种结构层含水量大、土的强度低、模量小，是路基填土与多年冻土间的一种软弱夹层。当人为上限较小时，对路基的稳定

性有严重的负面影响。但如果融化使这一软弱结构层增至一定的厚度，在无条件排水固结的情况下，当人为上限增加至一定的深度，上限变化对路基变形无影响，对路基仅受大气温度变化的冻融作用（与季节冻土地区相同），这时对路基就不再考虑多年冻土的影响。

二、冻胀特性

随着多年冻土季节融化层冻结过程而发生土中水分冻结，产生土体体积膨胀的现象称为土体的冻胀性。它取决于土体的粒度成分、矿物成分、含水量、冻结条件等。冻胀的主要表现是土层不均匀升高，当路基土层产生冻胀时会导致路基开裂、路面裂缝及破损。如果公路桥涵基础修建在冻胀土中，就会受到冻胀力的作用，当恒载不能克服冻胀力时，桥涵基桩将被隆起导致结构物破坏。

冻胀沿冻结深度的分布是不均匀的：表层（0~30cm）约占总冻胀量的3%~25%；中间（30~70cm）约占21%~56%；下层（>70cm）约占1.2%~8%。一般来说，当达到最大冻结深度的50%~70%时，其冻胀量达到峰值，冻胀量占总冻胀量的80%~90%。土的分散性越大，其冻胀性越大。颗粒粒径为0.005~0.0074mm的粉粘粒具有最大的冻胀性。当土体的密度较小时，冻胀性随密度增大而增大，当土体的干密度超过 $1.68 \sim 1.8 \text{g/cm}^3$ 时，冻胀性则随土体密度增大而减小。一般来说，冻胀量随土体中负温的降低而增大，粘性土剧烈冻胀土温为 $-1^\circ\text{C} \sim -7^\circ\text{C}$ ，砂土为 $-0.5^\circ\text{C} \sim -3^\circ\text{C}$ ，此范围内可达到总冻胀量的80%~90%。附加荷载对土体的冻胀会产生抑制作用，随着附加荷载强度的增加，土体的冻胀量会相应地减小。

三、冰水害特性

温度是引起冻土地基融沉、冻胀的主要原因。但若土中无水或含水量很小，虽有温度的升降，土是不会产生融沉与冻胀的，即“融而不沉”或“冻而不胀”。只有土的含水量大于某一数值后，土才明显地出现融沉与冻胀，该界限分别称为土的起始融沉含水量 w' 和起始冻胀含水量 w_0 。其值随土质而异，当地基土的含水量超过 w' 、 w_0 时，融沉、冻胀将随含水量的加大而递增，冻胀时若有水分补给就更为剧烈。由此可见，地基土的融沉与冻胀完全就是土中冰的融化与水的冻结作用，冰水是冻害之源。

冰水害主要是指在路堤上方有露出地表的泉水，或开挖路堑后地下水自边坡流出，在隆冬季节随流随冻，形成积冰掩埋路基面或边坡挂冰、路堑内积冰等病害。这种病害是发生在寒冷及严寒地区特有的路基病害，在严寒的多年冻土地区则更为严重。对于路基工程来说，路堑地段较路堤地段冰害要多，尤其发生在浅层地下冰发育的低填浅挖及零断面地段的冰害，危害程度更大。对有一定填土高度的路堤，危害程度相对较小。

第三节 多年冻土区工程建设与研究

一、冻土工程建设与研究

（一）国外进展

人类对冻土的认识研究伴随着工农业生产实践，经历了不断发展的历史过程。国际上对

冻土工程问题开展研究进而建立起独立学科的当属俄罗斯。早在 16 世纪就有西伯利亚和北美有冻土的报告, M. B. 罗蒙诺索夫在 1757 年发表了题为“冻土地”的科学综述, 对“冻土地”的形成及其气候、地形的关系提出看法。19 世纪上半叶时, 就已初步获得了西伯利亚冻土层的温度、厚度、埋藏条件和分布情况等资料。19 世纪后半叶 西伯利亚工农业、人口大量迁移, 尤其是西伯利亚大铁路的建设极大地推动了冻土研究。1904 ~ 1914 年间修建的阿穆尔铁路常因冻融影响而被破坏, 每年要耗费大量的资金维护, 这进一步促进对冻土工程地质研究。在后来的贝加尔 ~ 阿穆尔铁路干线修建中曾开展了大量的冻土研究工作。1912 年俄罗斯学者出版了《永久冻土与永久冻土上的建筑物》一书, 阐述了外贝加尔永久冻土条件下建造建筑物的方法, 为工程冻土学的发展做出了巨大贡献。1917 年后, 冻土研究进入有计划有目的研究阶段, 前苏联成立了冻土研究机构, 他们在冻土力学、冻土温度场计算等理论分析方面有其独到的见解, 这些对后来冻土研究有很大的借鉴作用。谢尔金探井(深 116m)的冻土温度资料在 1925 年测得。1927 年《苏联境内永久冻结土壤》一书的出版标志着冻土学逐步发展成为一门独立的学科,《普通冻土学》作为第一部冻土学教科书于 1940 年出版。

在北美, 16 世纪的文献中已出现哈得逊湾深处的岩石为永久冻结状态及埃什绍利茨湾沿岸有厚层地下冰体存在的报道。第二次世界大战之前, 北美在多年冻土地区(美国的 Alaska 以及加拿大的 Yukon Territory) 开采金矿, 主要进行了一些与道路工程相关的季节冻土研究, 多年冻土的研究只是在地质勘察过程中进行了有限度的探索。1943 年诺曼布尔斯 ~ 阿拉斯加费尔班克斯的 Canol 输油管道建成, 长约 2000km, 由于没有认识到冻土地区输油管道工程所面临的问题, 管道直接铺设在地面上, 导致多年冻土融化下沉而致管道于次年废弃。第二次世界大战中, 亚北极地区军事工程建设受冻土问题困扰, 迫使美国军事部门成立专门研究机构, 开始了对工程冻土学的大规模研究。1961 年美国陆军部将北极建设与冻结作用实验室和雪冰与多年冻土研究所合并成立了寒区研究和工程实验室(US Army Cold Region Engineering Lab, CRREL), 专门从事北极战争条件、房屋结构、道路工程等寒区工程研究, 并取得了丰硕成果。Alaska—Canada 公路 加拿大、阿拉斯加军事基地、机场跑道, Normanwells—Alaska 公路 以及战后 1950 年 Alaska 铁路修建(费尔班克斯至苏厄德)遇到的冻土问题, 促进了冻土工程研究的迅速发展。20 世纪 60 年代, 伴随着北极海洋石油的大规模开发, 开始了北极海岸和海底多年冻土研究。70 年代在对多年冻土和冻土环境开展深入研究的基础上, 修建了北美最大的 Alaska 输油管道工程。该管道从普拉德霍贝到瓦尔迪兹, 贯穿 Alaska 南北全长 1280km, 管径 1.22m, 原油温度 70℃ ~ 80℃。管线 70% 通过多年冻土区, 在融化敏感类冻土区采用架空油管设计方案, 并配置了必要的热棒(热桩)以避免冻土融化。

(二) 国内进展

我国在春秋战国时期(公元前 770 ~ 公元前 221 年)就出现了有关冻土的记载。20 世纪 40 年代已有对西部高山多年冻土及东北多年冻土的报道。但我国冻土工程研究起步较晚, 20 世纪 50 年代青康公路、青藏公路、大小兴安岭林区公路及铁路的修建, 开创了我国多年冻土地区冻土工程研究的新纪元。1956 年辛德奎等人在整理以往东北地区冻土调查资料基础上发表了“中国东北地区多年冻土的分布”一文, 这是我国第一份关于东北多年冻土分布特征的总结。1957 年铁道部门在大、小兴安岭林区铁路勘测设计中调查了冻土分布和各种冻土工程地质现

象，并将相关成果总结到《多年冻土的工程地质和铁路建筑》一书中（铁道部第三设计院，1958）。1953年青康公路、1954年青藏公路通车，青藏高原多年冻土问题引起交通、铁道部门的关注，1956年青藏铁路第一次勘测设计，此后近40年间围绕青藏公路的改建、青藏铁路新建国内冻土工程研究人员开展了大量的研究工作，并由此确立我国冻土工程研究在国际上的领先地位。

为研究青藏高原多年冻土，服务于青藏公路、青藏铁路工程，1960年中国科学院在兰州成立了冰川积雪冻土研究机构，同年铁道部高原铁路科研所也在兰州成立，相关单位研究人员于1960~1962年开展了青藏公路沿线的冻土考察，1965年《青藏公路沿线冻土考察论文集》系统地总结了高原冻土的分布、温度状况、地下冰等特征，标志着我国冻土研究进入新的阶段。1973年交通部成立青藏公路科研组，此后，交通部第一公路勘察设计院、中科院兰州冰川冻土研究所等单位针对青藏高原多年冻土地区公路修筑技术进行了长达30年的不断研究，在工程界首次实现多年冻土区大面积铺筑沥青路面并获得成功。同时，先进、丰富的高原多年冻土区路基修筑技术为21世纪初青藏铁路的开工建设提供了宝贵的经验。

二、多年冻土区公路工程建设与研究

（一）国外进展

冻土是温度敏感性岩土介质，除温度外，影响其稳定性的因素还包括岩性、含水量、地热以及工程作用。这些因素中，只有工程的影响是人为因素，也是维持和调控地温的主动因素。目前已有的工程措施，从对地温影响的方式角度出发，可以划分为被动措施和主动措施两大类。前者主要指维持地温的原始状况或减缓冻土的退化；后者是指积极主动地改进冻土的热状况，使其向有利于工程稳定性的方向发展。

1. 被动工程措施

被动工程措施除填筑一定的路基高度以保护其下冻土不致退化外，主要包括以下内容：

（1）改变土体表面热辐射条件。如 Konratjev. V. G (1996)提出的，将路基表面或边坡面涂刷白色油漆，或在路基面处铺设白色碎石，修筑遮阳避雨棚，冬季清除路基表面及两侧的积雪，以保持路基土体与大气间的辐射条件。

（2）改变路基土体与大气及原冻土热传导状况。目前，对基于这一原理的工程措施应用和研究较为深入广泛，其中研究最为广泛的是保温材料措施。早在20世纪60年代，美国就有将保温层用于保护多年冻土的专利提出。60年代末，在美国阿拉斯加 Kotzebue 机场建设中，即在道路填土中采用了聚苯乙烯保温层；70年代初，加拿大在多年冻土区砾石公路上进行了保温层试验研究；俄罗斯在修建贝加尔-阿穆尔铁路时，在部分区段道碴下及边坡上使用了泡沫板材料。上述工程研究表明，隔垫层的工程效果较好。

以上被动工程措施的出发点在于克服或延缓由于冻土退化造成的路基破坏。在长期的冻土退化背景下，路基仍然可能会出现一系列的问题，并需要不断地投入维护费用。

2. 主动地温调控措施

主动地温调控措施主要包括采用调控传导和调控对流的方法。已有的调控对流的方法包

括通风路基、碎石路基及热棒：

(1)通风基础曾被广泛应用于房屋建筑。对于通风路基的研究，1974年美国曾在阿拉斯加的费尔班克斯(Fairbanks)西40km的公路上进行现场试验，试验场冻土为富冰粘土，试验选用了内径20~50cm的金属波纹管。通风管道小坡度倾斜并平行公路埋放于坡脚附近，沿纵向一定间隔设置竖向管以发挥“烟囱效应”促进空气的流动。研究中对热流以及管道的热影响范围进行了解析分析，并对管体的最佳位置进行数值模拟分析，结果认为应用通风管路具备可行性。但目前通风管在冻土区公路路基上的使用效果研究有限，冻土大国俄罗斯亦尚未见使用通风管的报道。

(2)碎(片)石路基。其原理是应用碎(片)石堆砌体实现冬季蓄冷夏季隔热的效能。该方法曾应用于贝加尔~阿穆尔铁路IV级融沉性富冰地区和永久冻土地区。美国在阿拉斯加公路路基上也进行过这方面的试验。

(3)热棒是利用气液两相转换，通过对流循环换热来实现热量传输的装置。早在1963年，美国的Long.E.L就曾提出将热棒应用于保护冻土地基稳定性的方法，之后就得到了较为广泛的应用。

此外，有关文献还有关于西伯利亚多年冻土区采用在土工格网中充填砂砾修筑路基的报道。

国外关于多年冻土区公路工程研究方面详尽而全面的资料不多，且欧亚大陆、北美大陆工程涉及的冻土受纬度控制基本上属低温冻土，冻土环境变化受人为干扰较小，冻土比较稳定。

(二)国内进展

我国多年冻土区公路工程问题以青藏公路高原冻土环境为典型代表，受海拔和纬度双重制约，具有不同于高纬度冻土的特殊性。中国在公路建设中第一次遇到高原多年冻土是1954年7月修建青康公路(214国道)查拉坪段时，由于当时缺乏对多年冻土及其工程防治措施的认识，按一般沼泽地段施工常用的挖淤换土的处治方法处理，结果造成多年冻土大面积暴露融化，后经改移路线填筑路基，问题才得以基本解决。

1956年在青藏公路第一次改建工程中，又多处发现多年冻土，限于当时仍缺乏有效的处理措施，导致了以后的工程冻害隐患。1972年青藏公路再次进行改建，并加铺吸热性强的沥青路面，给公路建设增加了更大的难度。青藏公路科研组于1973~1978、1979~1984、1985~1999年对在多年冻土地区修筑沥青路面的有关技术问题开展了三期研究。第一期研究重点是多年冻土区沥青路面下路基设计原则和路基最小填土高度；第二期研究重点是青藏公路地下冰分布规律、黑色路面修筑技术研究和沥青路面下路基稳定性研究；第三期研究重点是多年冻土区公路工程地质研究、路基温度场研究、路基变形研究及隔热材料在路基中的应用研究。铁路、林业等部门也分别在青藏高原和东北、大兴安岭等多年冻土地区，针对铁路路基、林区公路等进行了相关研究。20世纪90年代，在修建214国道时，借助于青藏公路的科研成果，针对214国道的特殊情况相应开展了214国道沿线多年冻土地区的公路修筑技术研究。此外，20世纪90年代末，黑龙江省针对高纬度岛状多年冻土地区开展了相应的公路修筑技术研究。

2001年6月开工建设的青藏铁路，在高原冻土区线位基本依青藏公路布设，铁路部门及

中国科学院冻土区旱区环境工程研究所根据青藏公路路基病害特征开展了铁路冻土路基稳定性研究；为保证青藏铁路建设的特殊交通需要，2002年5月交通部对青藏公路进行全面整治，同时立项开展多年冻土区公路修筑成套技术研究，重点依托青藏公路铁路建设期整治工程开展了公路冻土路基综合稳定措施研究。

第三章

多年冻土区公路工程地质勘探

第一节 多年冻土工程地质特性

多年冻土是一种对温度敏感和易变的地质体，是低温的多相体系。在这个多相体系中，水和冰是最易相变的，其工程地质特性的变化是冻土各相随环境温度变化的综合反映。环境温度的变化究其原因一般包括两个方面：一方面，主要是通过热传导使土体增温或降温，从而影响到冻土的稳定性；另一方面，在热交换过程中，体系与环境发生不可忽略的物质交换，而物质交换又带来更大的能量交换，冻土体除了温度变化之外，其结构与构造还受到很大的扰动，工程性质随之也发生变化。

冻土体是在一个开放体系中发生变化的。公路的修筑，破坏了冻土天然条件下的热平衡状态，在不采取冻土保护措施的情况下，路基下多年冻土环境温度一般朝着不利于冻土保存的方向发生变化。为了开发利用多年冻土，在多年冻土区进行公路建设，就必须研究多年冻土，研究多年冻土的基本特性，研究多年冻土的工程性质。

一、多年冻土的热稳定性

顾名思义，冻土就是冻结状态下的岩土体。冻土处于负温状态，其得以保存的条件与温度息息相关，具有温度敏感的特性。随着温度的变化，冻土中冰的含量和冰水之比也会发生变化，从而其各种性质也发生变化，也就是说，冻土是一种具有较强可变性质的地质体。

研究表明，对于松散土，其冻结温度取决于土的矿物成分、水分和盐分。在其他条件相同的情况下，冻结温度随含水量的增加而升高，随含盐量的增大而降低。

冻土的热稳定性又称冻土的热惰性，是指任何一种冻土的热状况对外界条件变化响应的敏感程度。前苏联学者的研究表明：冻土的热惰性可以用外界条件影响下多年冻土的融化速率定量表示，并且主要与冻土的温度及含冰量有关，前者决定冻土的热容量，后者决定冻土的相变热。

二、冻土上限附近的水分迁移及其工程性质变化

对于粘性土，在冻土上限附近，冻结成冰的过程会产生冻结吸力，使结合水膜变薄，土水势降低，导致未冻区的水分向正冻区迁移，以抵消冻结抽吸力，补偿减薄了的结合水膜和降低了的土水势。在水分迁移的同时，会发生不等量的盐分迁移，在从融化状态到冻结状态的过程中，粘性土的含水量和含盐量趋于增大，良透水层的含水及含盐量则趋于减小；在温度升高时，

土的未冻结水含量趋于增大。在有排水条件的情况下，土的含水量和含盐量趋于减小。但在排水不良的情况下，如果土的上层已经融化而下层仍处于冻结状态，强烈的蒸发作用将把盐分进一步引至土表，从而会进一步加剧土的盐渍化。经过多年的反复冻融和蒸发，土的含盐量逐渐增大，在一定的条件下可以转化为弱冻胀性土或岩胀性土。

按照水分迁移规律可将正冻土体分为 3 个区 (如图 3-1 所示)

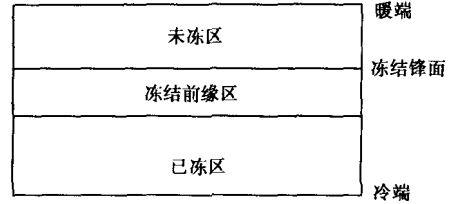


图 3-1 正冻土分区图

(1)未冻区：该区中只有土、水、气而没有冰，土中水分场的分布由该区段土体内的土水势决定。

(2)冻结前缘区：众多的试验研究表明，尽管这一区域很小，但冻土中的水分迁移主要受该区的控制，此区为水分迁移最为剧烈的部分，因此也是冻土中水分迁移计算的核心。

(3)已冻区：此区中土体已经完全冻结，土体内结构相对比较稳定，尽管水分迁移仍然存在，但导水性很差，因而水分迁移量也很小。

1. 一般数学模型

对于正冻土中的水分迁移，目前国内外学者已经提出很多数学模型，其中最为常见的是应用达西定律及克拉伯龙方程联立的水分场方程，达西定律给出：

$$v = K \frac{\partial \Psi}{\partial x} \tag{3-1}$$

式中： v ——迁移速率，cm/s；
 K ——导水系数，cm/s；
 Ψ ——土水势，cm 水柱；
 x ——坐标，cm。

在未冻区

$$\Psi = P_w + x_0 \tag{3-2}$$

式中 P_w 为水压力。

从而
$$\frac{\partial \Psi}{\partial x} = \frac{\partial P_w}{\partial \theta} \frac{\partial \theta}{\partial x} \quad K \frac{\partial P_w}{\partial \theta} = D \tag{3-3}$$

式中： D ——扩散系数，cm²/s；
 θ ——含水量。

由式(3-1)、式(3-2)、式(3-3)得

$$v = D \frac{\partial \theta}{\partial x} \tag{3-4}$$

在冻结前缘区和已冻区 如果假定克拉伯龙方程成立 即

$$\frac{dP_w}{\rho_w} - \frac{dP_i}{\rho_i} = L \frac{dT}{T_k} \tag{3-5}$$

式中： P_i ——冰压力；
 ρ_i, ρ_w ——冰和水的密度
 L ——潜热；

T_k ——绝对温度；

T ——温度。

假设 $\rho_i = 0$, 则

$$\frac{dP_w}{x} = \frac{\rho_w L}{T_k} \frac{dT}{dx} \quad (3-6)$$

由式 3-6 和式 3-1 得

$$v = \frac{\rho_w KL}{T_k} \frac{dT}{dx} \quad (3-7)$$

但是对已冻结的正冻土，其导水系数却很难用试验准确确定，在一些数值模拟中通常假设 K 是 θ 的函数或假设 K 是 T 的函数进行计算，这对于较为稳定的已冻区不会有太大的影响，而对于有剧烈水分迁移的冻结前缘，则会产生很大的影响。众所周知，在此区中未冻水的含量骤然降低，且降低过程很难用试验确定。若假设 $K = f(\theta)$ 则可靠性很低，因此在前缘区采用此方法只能反映出水分迁移的趋势，而无法保证模型的准确性。

2. 迁移势模型

1) 分凝势

为了避免导水系数在冻结前缘区的敏感性和不确定性，Konrad 等 (1981) 提出了预测冻胀的较为实际的简单方法，并且指出在冰透镜体形成过程中，冻结前缘处的水分迁移速率 v 与此处的温度梯度 G_f 成正比，这个比例系数被定义为分凝势 S_p ，即

$$v = S_p G_f \quad (3-8)$$

如果外界条件不变，假设水透镜体形成过程是一稳定过程，则可认为分凝势 S_p 为一常数。采用这个方法，当通过试验确定 S_p 后，则可以采用式 3-8 求出冻结前缘区的水分迁移。

2) 迁移势及迁移势模型

采用分凝势的概念解决了冰透镜体形成这一稳定过程中的水分迁移。然而，当冻结连续发生时，仍假设 S_p 不变显然是不正确的，未冻区水分场的变化都会引起 S_p 的变化，而且此时分凝势的概念已不能再被采用。为了解决非稳定条件下冻结前缘区的水分迁移问题，有学者提出了迁移势 M_p 的概念（广义分凝势），即仍然假设式 3-8 成立，但比例系数已不再是常数，而是一状态函数：

$$v = M_p G_f \quad (3-9)$$

其中

$$M_p = M_p(v_f, w, P_{OV}) \quad (3-10)$$

式中： v_f ——冻结速率；

w ——含水量；

P_{OV} ——荷载。

采用此法即可描述动态冻结问题中冻结前缘区的水分迁移，如果通过试验确定出 M_p ，即可通过式 (3-9) 求解冻结前缘区的水分迁移。

联立式 (3-4)、式 (3-7)、式 (3-9) 即构成了 3 个区的水分场模型。

3. 迁移势的试验确定方法

对一土柱进行两端控温的单向冻结试验，观测整个土柱中的温度场 $T(x, y)$ ，若已知含水量 w 及冻结温度与含水量的关系 $T_f = T(w)$ ，则通过 T_f 确定出冻结锋面。如果以此处的温度

梯度代表冻结前缘区的冻结梯度，可得到 $G_f = \left. \frac{dT}{dx} \right|_{T=T_f}$ ，通过 Δt 时段内冻深 H_f 的变化 可得

到 $v_f = \frac{\Delta H_f}{\Delta t}$ 试验后测出此处含水量的变化 Δw

$$\text{由} \quad v = \gamma_d \Delta w v_f \quad (3-11)$$

可得到 v 由式 (3-9) 可得到：

$$M_p = \frac{v}{G_f} \quad (3-12)$$

通过每组试验则可找出 $M_p = M_p(v_f, w, P_{Ov})$ 。

三、冻土热物理特性

冻土与一般融土的本质区别是冻土处于冻结状态，其物理特性与温度变化密切相关，尤其是冻土中的三相之一——水 既有液态的 也有固态的 在一定的温度条件下最易发生相变 从而导致冻土的物理力学性质发生变化。

冻土的基本热物理指标包括导热系数、热容量和导温系数。不同的冻土其比热、导热系数、导温系数是不同的。冰的比热是液态水的一半，在其他条件相同时，土冻结后的比热总是小于它在融化状态时的比热。只有在土的含水量极小或者土的绝大部分水保持液态时，土在冻结状态和融化状态下的比热才没有显著的变化。冰的导热系数是液态水的 4 倍 (中国科学院兰州冰川冻土沙漠研究所, 1975)，因此，在其他条件相同时，冻土的导热系数一般都大于融土，只有在土非常疏松和非常干燥，土的组成颗粒非常小或含盐量很大的时候，因冻结后冰晶极少，它在冻结前后的导热率才不会有实质上的区别。

(一) 导热系数 λ

导热系数是表征冻土在温度梯度作用下传导热能的指标，常在有关土的冻融深度、热量周转和工程热工计算中应用。在多孔隙介质中 热能的传递是在各种机理 (传导、对流、辐射) 共同作用下发生的，由于对流和辐射在热量传递中影响很小，故在实际应用中可以忽略不计。

在一维稳定热传导情况下的傅立叶定律为： $q = -\lambda \text{grad} t$

式中： q ——单位时间通过单位面积土的热量 $W/(m \cdot K)$ ；

t ——温度 K ；

$\text{grad} t$ ——温度梯度。

由上式可知导热系数的含义，即导热系数为当土层界面温差为 $1^\circ C$ 时 在单位时间内通过单位面积、单位厚度的热量。

(二) 热容量 c

土的热容量是表征土的蓄热性质的物理量，是进行热工计算所必须的参数之一。它有以下两种表示方法：

(1) 重量热容重 $c_{重}$ 即比热 是使单位重量的土温度升高 $1^\circ C$ 所需要的热量。

(2) 容积热容量 $c_{容}$ 是使单位体积土温度升高 $1^\circ C$ 所需要的热量。

重量热容重与体积热容重存在着以下的关系：