

DESIGN THEORY AND PRACTICE OF
THE ROAD IN FROZEN SOIL REGIONS

冻土地区道路设计 理论与实践

汪双杰 黄晓明 著



科学出版社

冻土地区道路设计理论与实践

汪双杰 黄晓明 著

科学出版社

北 京

内 容 简 介

本书立足于中国青藏高原及东北等冻土地区道路工程技术的特点,分析了国内外冻土道路工程现状,总结了多年来上述地区道路工程施工实践的情况,应用混沌、人工神经网络、数值模拟等先进理论方法建立了道路冻土路基的变形计算、监测和预警体系,构建了包括道路线形设计、路基稳定性设计、路面耐久性设计的成套设计理论体系。本书内容包括道路冻土区划,路基路面病害机理分析,路基路面温度场数值模拟,冻土路基融沉分析及变形预测,道路线形、路基稳定性、沥青混凝土路面耐久性设计,道路新材料研究与应用等。

本书可供从事冻土地区道路工程及铁路、土建工程的科研、设计、施工(新建及养护)与建设管理技术人员参考,亦适合高等院校、科研机构相关专业技术人员、教师、研究生学习参考。

图书在版编目(CIP)数据

冻土地区道路设计理论与实践 / 汪双杰, 黄晓明著. —北京: 科学出版社, 2012
ISBN 978-7-03-033996-6

I. ①冻… II. ①汪… ②黄… III. ①冻土地区—公路—研究 IV. ①U412.36

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2012)第 063090 号

责任编辑: 顾 艳 曾佳佳 胡 凯/责任校对: 冯 琳

责任印制: 赵德静/封面设计: 王 浩

科学出版社出版

北京东黄城根北街 16 号

邮政编码: 100717

<http://www.sciencep.com>

中国科学院印刷厂印刷

科学出版社编务公司排版制作

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2012 年 4 月第 一 版 开本: 787 × 1092 1/16

2012 年 4 月第一次印刷 印张: 27 3/4 插页: 4

字数: 642 000

定价: 88.00 元

(如有印装质量问题, 我社负责调换)

前 言

全球冻土分布面积约占陆地面积的 50%，其中多年冻土约占陆地面积的 25%，约为 $3.5 \times 10^7 \text{km}^2$ 。我国多年冻土分布面积约 $2.15 \times 10^6 \text{km}^2$ ，青藏高原多年冻土占我国多年冻土区面积的 70%，约 $1.5 \times 10^5 \text{km}^2$ 。

目前，国内外在冻土力学等方面开展了较为广泛的研究，但对冻土地区道路设计理论的研究较少。随着我国青藏高原多年冻土区青藏线、滇藏线、新藏线以及大兴安岭地区高纬度冻土区道路路面黑色化的推进，冻土路基的水热平衡也将随之改变，冻土地区道路将产生路基沉陷、路面裂缝、翻浆等病害。同时，随着中国经济的发展，多年冻土地区的道路、铁路、土木、水利等工程建设蓬勃推进，特别是冻土地区的道路修筑前景将更为广阔，这将为冻土地区道路的设计、施工及养护提出新的课题。因此，为了能够更加科学地指导冻土地区道路的设计和施工，本书以青藏公路新建、改建工程为依托，以多项交通部西部科技专项为支撑，介绍了作者多年来在冻土地区道路设计理论及施工技术实践方面的研究成果。本书以冻土地区道路设计理论为基础，兼顾冻土地区道路设计与施工实践，应用混沌、人工神经网络、数值模拟等先进理论方法，对路基稳定性进行计算，并对其变形进行预警；介绍了道路冻土地质分类、路线优化设计、路基稳定性设计、路面耐久性设计、道路新材料开发及应用等内容，最终形成了由道路冻土路基变形预警、道路整体设计构成的成套的设计理论与实践体系。

全书以我国冻土地区道路设计、修筑、养护工程为基础，以青藏高原高海拔、东北高纬度多年冻土区道路工程研究成果为依托，并吸收了国内外在冻土地区道路设计方面的先进思想。本书由汪双杰、黄晓明统稿，黄晓明审核。全书共分八章：第一章、第二章由汪双杰完成；第三章由黄晓明、侯曙光完成；第四章、第五章由汪双杰完成；第六章由汪双杰、黄晓明完成；第七章由黄晓明、李志栋完成；第八章由汪双杰、黄晓明完成。同时还要感谢赵永国、章金钊、陈团结、陈建兵、张娟、张久鹏、许涛、马涛、张军辉、孙志林、岳学军等为本书所做的贡献。

在本书编写中得到了诸多研究人员和单位的支持和帮助，并得到江苏省优势学科建设经费和东南大学出版基金的资助，在此一并感谢。

作 者

2011 年 8 月

目 录

前言

第一章 冻土及冻土概况	1
第一节 冻土及冻土工程地质区划、分类	1
一、冻土概况	1
二、冻土工程地质区划原则和指标	1
三、冻土区划	2
第二节 道路工程冻土分类	5
一、道路工程冻土分类标准及指标	5
二、依据冻土人为上限分类	7
三、依据冻土路基稳定性分类	7
第三节 冻土分布状况	9
一、西部高山高海拔冻土分布	9
二、青藏高原高海拔冻土分布	10
三、高纬度多年冻土	15
第四节 冻土地区气候及地温特征	17
一、冻土地区气温变化趋势	17
二、太阳辐射条件	18
三、降水量变化	18
四、冻土地区地温状态	19
第二章 冻土地区道路使用状况调查与分析	20
第一节 冻土地区路基病害调查与分类	20
一、冻土路基病害调查	20
二、冻土路基病害类型与特征	22
第二节 冻土地区路基病害机理分析	24
一、冻土路基病害发展过程	24
二、冻土路基病害成因定性分析	30
三、冻土路基病害成因定量分析	37
第三节 冻土地区路面病害调查与分类	50
一、沥青混凝土路面病害调查及主导类型	50
二、水泥混凝土路面病害调查及主导类型	52
第四节 冻土地区路面病害机理分析	52
一、沥青混凝土路面病害机理分析	52

二、水泥混凝土路面病害机理分析	54
第三章 冻土地区路基路面温度场数值模拟及分析	55
第一节 冻土路基天然上限退化现状	55
一、气候变暖对冻土路基天然上限的影响	55
二、冻土地区路基温度场变化规律	56
三、沥青路面对冻土路基温度场影响的分析	74
四、水泥混凝土路面对冻土路基温度场影响的分析	78
第二节 冻土地区路基水-热-力三场耦合模拟分析	79
一、水-热耦合控制方程及模拟计算	79
二、力-热耦合控制方程及模拟计算	81
三、水-力耦合控制方程及模拟计算	83
四、水-热-力三场耦合数值模拟结果与分析	83
第三节 冻土路基温度场数值模拟	85
一、温度场控制微分方程	85
二、温度场计算的有限元方程	86
三、温度场计算模型及材料参数	88
四、基于 ABAQUS 软件的温度场计算实施	89
五、温度场数值模拟结果与分析	91
第四节 沥青路面下伏冻土路基温度场的数学模型及计算分析	96
一、路基内热流耦合的基本模型及边界条件确定	96
二、隔热冻土路基模型及分析	97
三、块、碎石冻土路基对流模型及分析	102
四、无动力热棒冻土路基等效传热模型及分析	113
第四章 冻土地区路基稳定性分析及变形预测	127
第一节 冻土地区路基稳定性及变形特征分析	127
一、冻土路基变形主要影响因素	127
二、冻土路基变形计算	128
三、不同工程措施的路基变形分析	131
第二节 冻土融沉变形混合物理论	135
一、冻土混合物的基本假设	136
二、混合物理论基本方程及不等式	137
三、混合物热力学本构方程	138
四、冻土融沉中的相变考虑	150
五、冻土融沉中的唯象关系	150
六、冻土融沉过程的固结方程	152
第三节 冻土融沉变形试验及数值计算	153
一、冻土融沉试验及结果分析	154
二、冻土融沉数值计算及结果分析	164

第四节 冻土地区路基变形预测分析	169
一、基于偏最小二乘法的冻土路基变形预测	169
二、基于人工神经网络的冻土路基变形预测	188
三、冻土路基变形及应力分析	202
第五章 冻土地区道路线形设计	218
第一节 冻土地区车辆动力性能评价及运行速度模型建立	218
一、冻土地区车型 W/G 分析法	218
二、冻土地区车辆动力性能评价	218
三、冻土地区道路车辆运行速度影响因子敏感性分析	222
四、冻土地区道路运行速度模型	226
第二节 冻土地区道路平面线形设计	228
一、直线长度	228
二、高海拔冻土区驾驶员反应时间与停车视距	232
三、平曲线最小半径与超高	236
第三节 冻土地区道路纵断面设计	245
一、纵坡坡度	245
二、纵坡坡长	247
三、坡弯组合	252
四、竖曲线	253
第四节 冻土地区路基横断面组成设计	255
第五节 高原冻土区道路线形指标推荐	256
第六章 冻土地区道路路基设计	259
第一节 冻土地区路基设计理论沿革及设计原则要求	259
一、冻土地区路基设计理论沿革	259
二、冻土地区路基设计原则和要求	263
第二节 冻土地区一般路基横断面结构设计	265
一、路堤设计	265
二、路堑设计	269
三、低填浅挖及零断面路基设计	272
四、挡土墙设计	273
第三节 冻土地区特殊路基结构设计	276
一、不良地质地段路基设计	276
二、块、碎石路基设计	277
三、隔热层路基设计	285
四、遮阳板路基设计	293
五、无动力热棒路基设计	296
六、通风管路基设计	303
第四节 冻土地区过渡路段路基结构设计	304

一、填、挖过渡段路基设计	304
二、路基与桥(涵)过渡段路基设计	304
三、融区与多年冻土区过渡段路基设计	304
第五节 冻土地区路基排水设计	305
一、边沟设计	305
二、排水沟设计	305
三、挡水埝设计	305
第六节 取、弃土场设计	306
第七章 冻土地区道路沥青混凝土路面耐久性设计	307
第一节 冻土地区沥青结合料性能评价及其选择	307
一、现有沥青指标评价体系	307
二、沥青 FDT 试验及机理分析	308
三、基于韧性比 R_{TV} 指标的沥青评价体系	313
四、沥青结合料的选择原则及流程	318
第二节 冻土地区沥青混合料配合比设计	320
一、冻土地区沥青混合料配合比基本设计思路	320
二、影响沥青混合料性能的敏感性指标分析	320
三、冻土地区沥青混合料设计控制指标及试验参数推荐值	327
四、基于抗冻性能的沥青混合料配合比设计流程图	327
五、设计实例材料参数以及混合料试验指标	329
第三节 冻土地区沥青混合料路用性能评价	331
一、低温韧性指标合理性论证及其计算方法	331
二、非常规马歇尔试验	336
三、抗冻性能评价	343
四、低温抗裂性能评价	349
五、高温性能评价	351
六、冻融循环低温弯曲韧性评价	355
七、冻融疲劳特性评价	358
八、抗水损性能评价	364
第四节 冻土地区道路沥青路面结构类型选择	365
一、冻土地区沥青路面结构初步选择	365
二、冻土地区道路基层材料性能优化	379
第五节 冻土地区沥青路面结构设计	390
一、冻土地区沥青路面典型结构设计要求、原则及设计流程	391
二、冻土地区道路设计参数确定	392
三、试验路路面结构拟定	395
四、推荐沥青路面典型结构组合	407

第八章 冻土地区筑路新材料研究及其性能评价	408
第一节 硅藻土改性沥青胶浆性能	408
一、原材料技术性质	408
二、硅藻土改性沥青的制备	409
三、硅藻土改性沥青常规指标试验	410
四、硅藻土改性沥青高温动态剪切试验	412
五、硅藻土改性沥青低温弯曲梁流变试验	414
六、硅藻土改性沥青机理分析	416
第二节 硅藻土改性沥青混合料配合比设计	417
一、原材料技术性能	417
二、硅藻土拌和方法	418
三、矿质混合料级配优选	418
四、硅藻土改性沥青混合料最佳沥青含量确定	418
第三节 硅藻土改性沥青混合料低温抗裂性能研究	420
一、沥青混合料低温弯曲性能评价	420
二、老化对低温抗裂性影响的研究	422
三、硅藻土改性沥青混合料水稳定性研究	423
第四节 硅藻土改性沥青混合料高温性能研究	425
第五节 硅藻土改性沥青混合料隔热性能研究	426
一、热传导试验	426
二、热导率试验	429
主要参考文献	431
图版	

第一章 冻土及冻土概况

第一节 冻土及冻土工程地质区划、分类

一、冻土概况

冻土，一般是指温度在 0°C 或 0°C 以下，并含有冰的各种岩土。按岩土冻结状态保持时间的长短，冻土又可分为多年冻土与季节冻土。冻结数年至数万年以上的称为多年冻土。

地球上多年冻土区面积约为 $3.5 \times 10^7 \text{km}^2$ ，主要分布在北半球。包括欧亚大陆的西伯利亚和北美大陆的阿拉斯加及加拿大广阔地区的多年冻土，约占全球多年冻土总面积的 63%。

中国多年冻土分布面积约 $2.15 \times 10^6 \text{km}^2$ ，位居世界第三，包括位于欧亚大陆高纬度多年冻土区南缘的东北大小兴安岭(分布南界达北纬 $45^{\circ} \sim 46^{\circ}$)，以及西部高山和青藏高原等地。

二、冻土工程地质区划原则和指标

(一) 冻土区划原则

冻土自然区划原则主要有综合性原则和主导因素原则：前者强调进行某一区划时，必须考虑影响工程建设的各种因素，然后挑选一些具有相互联系的指标作为确定区域区界的根据，并认为不必用同一指标去划分全国某一级分区，同一分区不同段落的界限亦可参照不同标志去确定，但所有这些标志的选取必须保证各区内部具有区域和工程建筑的相似性；而后者强调在进行某一级分区时，必须按统一的指标来划分，这样才能做到严谨性和科学性，避免主观性。

冻土状况是气候特点、地理环境、地质背景、水文地质条件、地表植被、海拔等诸多因素作用的结果，而且根据地区的不同，影响冻土状况的主导因素也会有很大的不同；加之冻土分布的不确定性、影响的多因素性，最后所确定的区界偏差很大。

虽然我国冻土具有明显的纬度和高度分带性规律，但对于修筑在冻土之上的道路，由于其线形上的地形、地貌等诸多因素发生着经常性的改变，造成季节冻土区、岛状多年冻土区和连续多年冻土区相互穿插和镶嵌的现象。因此，很有必要在大的区划的基础上建立某一具体道路沿线的冻土区划图，为已建、改建、新建道路的设计、施工、维修和养护提供可靠的科学依据。

通过对上述主要区划原则的分析,并结合冻土发育规律,采用以主导性为主、综合性为辅的原则进行冻土的区划。

(二)冻土区划指标

根据对我国冻土及其与道路工程相互作用过程的认识,确定道路工程冻土采用三级区划:其中,第一、二级区划偏重于冻土的自然区划,以全国性的纬向地带性和构造区域性为依据,根据对冻土具有控制作用的地理气候因素来拟定;第三级区划侧重于道路工程与多年冻土相互作用的特征以及有可能产生的工程问题。这三级区划可归纳如下。

(1)一级区划:根据冻土分布地带性进行,注重冻土分布连续性和分布共有特征。

(2)二级区划:根据冻土区域性分布特征进行。

(3)三级区划:从冻土区道路建设要求出发,以道路稳定性的最重要影响参数对冻土区进行划分,需要时可增加不良冻土现象辅助指标。

从热物理学的观点来看,冻土是在岩石圈—土壤—大气圈系统热质交换过程中形成的,年均气温与多年冻土区(带)界限有一定的相关性。冻土的总体分布规律、区域特点都与年均气温和海拔表现出较好的相关性。因此,在一级区划中选用年均气温、海拔作为区划指标具有较好的合理性。二级区划主要以对一个区域内冻土连续性、冻土类型影响较大的气候因素和区域构造因素进行划分。三级区划主要以对道路稳定性有重要影响的冻土年均地温和冻土类型的主导因素进行划分,同时考虑地形、地貌、地质构造等影响。

三、冻土区划

(一)冻土一级、二级区划

按照决定冻土形成、存在的主导因素及其分布规律,可将我国冻土分为高纬度冻土、高山冻土、高原冻土三种类型。总体区划如表 1-1 所示。

表 1-1 冻土一级、二级区划

一级区划	I 高纬度冻土区	II 高山冻土区	III 高原冻土区
二级区划	I 1 大兴安岭北部大片多年冻土亚区	II 1 阿尔泰山—北塔山山地多年冻土亚区	III 1 青南—藏北高原北部大片多年冻土亚区
	I 2-1 大兴安岭南段西坡与呼伦贝尔高平原岛状多年冻土亚区	II 2 天山山地多年冻土亚区	III 2 藏北高原南部岛状多年冻土亚区
	I 2-2 大小兴安岭东、西坡丘陵及松嫩平原北部岛状多年冻土亚区	II 3 阿尔金山—祁连山山地多年冻土亚区	III 3 青藏高原东南缘山地岛状多年冻土亚区
	I 2-3 小兴安岭山地岛状多年冻土亚区	II 4 喜马拉雅山山地多年冻土亚区	

1. 高纬度冻土区

高纬度冻土集中分布于我国东北大小兴安岭地区，是欧亚大陆的高纬度多年冻土区的南缘。它的形成与存在的主导因素是一定纬度下出现的负年均气温，并且其形成及分布具有显著的纬度地带性规律，受其他区域因素(地质构造、岩性、地表覆盖、大气降水等)的影响亦表现出地域差异。因此，以年均气温 -4.0°C 等温线为主将高纬度多年冻土区分为南北两个区，即北部大片连续多年冻土亚区、南部岛状多年冻土亚区；依据大兴安岭南段岭脊线及小兴安岭西南坡麓线分成三个二级区，为岛状冻土亚区。

2. 高山冻土区

高山冻土主要分布于阿尔泰山—北塔山、天山、阿尔金山—祁连山和喜马拉雅山，仅出现在一定海拔以上。而岛状冻土出现的最低海拔的连线为多年冻土分布下界，其不是以某一条等高线而固定不变的线，而是以一定海拔为轴线，依不同自然地理、地质条件上下浮动的变动带，冻土由下界向上分布的连续程度增大，温度随之降低，厚度增大，具有明显的垂直地带性变化规律，其下界见表 1-2。

表 1-2 高山山地多年冻土下界 (单位: m)

冻土下界高山名称	南 坡	北 坡
阿尔泰山—北塔山	2200~2800 (岛状冻土上界)	
天 山	3100~3250	2700~2900
阿尔金山—祁连山	3700~3950	3450~3650
喜马拉雅山	5100~5300	

实际区划中，因受其所处地理、地质条件等影响，冻土下界可能偏离表 1-2 的值，因此将冻土分布范围放宽。另外，为了与目前中小比例尺地形图 300~500m 等高线间距相匹配，依据表 1-2 下界再向下 300~500m 圈定出各山地多年冻土分布范围，由此将高山冻土区划分成四个亚区。

3. 高原冻土区

青藏高原是耸立于中低纬度的巨大隆起，海拔平均在 4000m 以上，气候严寒，是世界上中低纬度带面积最大的多年冻土区。青藏高原北部及西北部是多年冻土最易发育的地区，冻土基本呈连续或大片分布，温度低、厚度大。由此向南、东南方向，随纬度及海拔降低、气温升高，逐渐过渡为岛状分布。高原南部岛状冻土区，在 109 线上北起安多，南至二道河以南，宽近 100km。南部岛状冻土区的形成主要与纬度、海拔、地质构造有关。由高原西北部冻土大片分布过渡到岛状分布是一个渐变过程，大体以年均气温 -4.0°C 包络线为界。东南部岛状冻土除水平方向不连续外，垂直方向常见不衔接的情况，一些地段存在双层冻土及深埋藏冻土层(埋藏深度 8~10m)，而高原南部岛状冻土则不同。所以，依据地质构造和年均气温等值线将青藏高原冻土区分成

三个亚区。

(二)冻土道路工程地质三级区划

1. 三级冻土道路工程区划思路

冻土区道路因冻土路基融沉而产生路面纵向开裂、边坡失稳、不均匀沉降、冻胀、路面网状开裂、翻浆等工程病害，其根本原因在于路基下部因冻土温度变化引起多年冻土的状况发生了变化，一般表现为冻土的抗压强度的降低、冻土中冰的消融和迁移。因此，根据冻土年均地温和冻土类型，将道路工程冻土区分为冻土稳定区、基本稳定区和不稳定区。

2. 三级区划指标

高温多年冻土自身处在十分脆弱的状态，生存环境和条件的改变，将会引起高温多年冻土的迅速升温及融化。所以，该地区沥青路面的修筑，将使冻土路基发生热融沉陷。冻土路基变形随年均地温的升高而增大，且绝大部分都发生在冻土年均地温高于 -1.5°C 的地区，因此主要将冻土年均地温作为道路冻土区划的重要指标之一。

3. 区划方案

为便于道路工程应用，在三级区划中将冻土划分为两类，即高含冰量冻土(主要包括富冰冻土、饱冰冻土、含土冰层)以及低含冰量冻土(主要包括少冰冻土和多冰冻土)，区划方案见表 1-3。

表 1-3 我国道路工程冻土的三级区划

年均地温	冻土类型	
	低含冰量冻土 (少冰和多冰冻土)	高含冰量冻土 (富冰、饱冰和含土冰层)
低温冻土($< -1.5^{\circ}\text{C}$)	多年冻土稳定区	多年冻土热稳定区
高温冻土($\geq -1.5^{\circ}\text{C}$)		多年冻土热不稳定区

4. 年均地温的确定

通过对多年冻土年均地温及与之相关的年均气温资料进行分析，采用年均气温进行地温分带。

从表 1-4 中可以看到，年均地温为 -1.5°C 的多年冻土对应的年均气温在东北地区基本为 -3.5°C ，青藏高原基本为 -5.5°C 。原则上首先以地温划分，当难以获取相关资料时可根据气温进行工程区划。

表 1-4 多年冻土地温带分布

带名	年均地温/℃	多年冻土厚度/m		带界处的年均气温/℃		分布地带	
		东北	青藏高原	东北	青藏高原	大小兴安岭	青藏高原
极稳定带	<-5.0		> 150	<-6.0	-8.5	高纬度大片多年冻土带，阴坡，沼泽化	高山地带
稳定带	-5.0~-3.0	>100	100~150				中高山地带
				-4.5	-6.5		
亚稳定带	-3.0~-1.5	50~100	60~100				低山及沼泽泥炭中
				-3.5	-5.5	岛状融区多年冻土带	
过渡带	-1.5~-0.5	20~50	40~60				高原、低山丘陵
				-2.5	-3.5		
不稳定带	-0.5~ 0.0	10~20	20~40				河谷地带
						岛状冻土带	
极不稳定带	±0.0	0~10	0~20	0.0	-2.5		河谷及岛状多年冻土地带

5. 冻土类型的确定

由上述高含冰量冻土分布规律可以给出如下高含冰量冻土分布区域，见表 1-5。

表 1-5 高含冰量冻土分布区域对照表

冻土区域类型	分布区域	
	连续多年冻土区	岛状多年冻土区
高含冰量冻土区	断陷盆地、湖相沉积构成的山间盆地、低山丘陵区、泥炭草炭发育和水分充足的其他区域	低山丘陵区阴坡、泥炭草炭发育和水分充足的其他区域
低含冰量冻土区	除上述区域外的其他区域	

当然，在具体区划过程中仍要考虑其他因素的综合影响，比如河流、湖塘造成的融区的存在以及冰锥、冻胀丘、融冻泥流、热融滑塌、热融湖塘、沼泽化湿地等不良冻土对道路造成的影响。

第二节 道路工程冻土分类

一、道路工程冻土分类标准及指标

(一)道路工程冻土分类原则与指标

随着冻土地区路面黑色化的推进以及全球气温的普遍上升，出现的热融下沉病害占 85%，而其中含有融化夹层的路段占热融下沉路段的 90%以上。因此，道路工程多年冻土分类原则应主要考虑冻土的融沉问题，分类指标应以控制路基稳定性的融沉变形量为

标准。

(二) 道路工程冻土分类标准

冻土路基的稳定性主要反映在路基变形量的大小及其对路面平整度的影响。路基失稳是指冻土路基在道路运营过程中及路基设计使用年限内产生了超过路基的容许变形沉降量。如果路基在较大范围内缓慢而均匀地沉降,则对路基路面强度和平整度不会造成较大的影响。但是,如果路基在一年内的冻融变形量很大,则会造成路基、路面过早破坏。因此,路基的容许变形量可用总沉降量和年内冻融变形量两个指标控制。

(三) 影响分类指标的主要因素

道路工程多年冻土分类应以冻土路基的融沉变形量为指标,冻土的融沉变形量可用下式计算:

$$S = A \cdot h + \alpha \cdot p \cdot h \quad (1-1)$$

式中, A 为冻土在自重下的融沉系数; h 为冻土融化层厚度; α 为冻土融化层在外荷载作用下的压缩系数; p 为外荷载的应力。在道路工程实践中,由于路基对多年冻土层所产生的附加应力很小 ($p \approx 0$),因此冻土路基的融沉变形量的计算可只考虑其中的第一项,即冻土在自重下的融化下沉量:

$$S = A \cdot h \quad (1-2)$$

因此,影响道路工程多年冻土分类指标的主要因素就具体表现为冻土的融沉系数及多年冻土融化层的厚度。前者主要取决于冻土的含冰特征,而后者不仅取决于冻土的含冰特征,而且与冻土的温度有关,是冻土热稳定性的体现,反映了多年冻土与路基、路面相互作用的结果。

通过研究,道路工程多年冻土分类应主要考虑不同冻土条件(冻土温度、含冰量)以及不同路基路面结构下冻土路基的融沉变形问题,并根据冻土路基的最大容许变形量提出以冻土路基稳定性为标准的冻土工程分类方案。为了确定冻土路基的融沉变形量,首先要确定多年冻土的融沉系数,其次针对一定的路基、路面条件计算路基下多年冻土的融化深度,最终得出不同冻土条件及不同路基、路面结构下冻土路基的融沉变形量,分别作如下讨论。

1. 冻土融沉系数

冻土融沉系数是与岩性、含冰量及干容重有关的、用于计算冻土地基融沉变形量的参数。在一定的岩性条件下,融沉系数随含冰量的增大而增大,随干容重的增大而减小。目前根据我国规范,以冻土的粒度组成及总含冰量为标准,以融沉系数为控制指标,将多年冻土分为少冰冻土、多冰冻土、富冰冻土、饱冰冻土和含土冰层五种类型。

2. 冻土路基融化深度

在多年冻土地区修筑道路,尤其是加铺沥青路面,极大地改变了原天然地表与大气间的热质交换条件,通常会引起路基表面温度升高,导致路基下冻土季节融化深度增大。现场观测资料表明,冻土路基人为上限的变化特征主要与路基表面的热学性状、路堤高度、当地的气候条件以及路基土层的热物理性质有关。路基下多年冻土的融化深度随路基使用年限的增长而增大,并随多年冻土年均地温的升高而增大,随多年冻土含冰量的增大而减小。

3. 冻土路基融沉变形量

根据路基下多年冻土融化层的厚度,结合不同含冰类型冻土的融沉系数(含土冰层的融沉系数取为 $A=45\%$),可以计算出不同年均地温及不同含冰类型条件下冻土路基的融沉变形量。

二、依据冻土人为上限分类

多年冻土上限分为天然上限和人为上限。前者指在天然条件下,多年冻土层顶板的埋藏深度。而由于人为施工使得多年冻土融化,其顶板下移或上移,形成新的上限,称为人为上限。依据人为上限的分段特点,可将冻土分为以下三种类型。

(一) 稳定型冻土

这类多年冻土稳定性很高,基本不受工程影响或可以通过一般措施减小或避免影响,主要分布于平均气温低于 -5°C 的昆仑山、风火山、可可西里、唐古拉山等地区,天然上限为 $2\sim 3\text{m}$,铺筑路基后的人为上限为 $4\sim 6\text{m}$ 。

(二) 过渡型冻土

过渡型多年冻土分布于昆仑山至风火山之间的楚玛尔河高平原,平均气温 $-5\sim -4^{\circ}\text{C}$,天然上限 $3\sim 5\text{m}$,路基下人为上限大于 5m 。随着气候转暖,这类冻土将会对这些区段产生较大的影响。

(三) 退化型冻土

退化型多年冻土分布在风火山南坡以南、沱沱河、乌丽盆地和布曲河谷地等广大地区,该地区年均气温 $-5\sim -2^{\circ}\text{C}$,天然上限大于 7m ,冻土稳定性极差,甚至完全消融。

三、依据冻土路基稳定性分类

通过以上研究,以多年冻土年均地温及含冰特征为主导影响因素,以控制冻土路基稳定性的最大容许沉降量为指标,提出以冻土路基稳定性为标准的道路工程冻土分类方案,见表 1-6。

表 1-6 道路工程多年冻土分类方案

年均地温	含冰类型	低含冰量冻土		高含冰量冻土		
		少冰冻土	多冰冻土	富冰冻土	饱冰冻土	含土冰层
高温冻土($\geq -1.5^{\circ}\text{C}$)		融沉稳定型冻土			不稳定型冻土	
低温冻土($< -1.5^{\circ}\text{C}$)					热稳定型冻土	

根据以上冻土路基稳定性分类标准，综合考虑冻土的岩性、含水量及温度对冻土路基稳定性的影响，可以在现有的按融沉系数对多年冻土分类的基础上，补充多年冻土年均地温对冻土路基稳定性的影响，提出以冻土的岩性、含水量及温度为主要影响因素的道路工程多年冻土的综合分类方案，见表 1-7。

表 1-7 道路工程多年冻土综合分类方案

土的种类		总含水量 $w_n/\%$	融沉系数 $A_0/\%$	冻土温度 $T_{cp}/^{\circ}\text{C}$	稳定类型
粗颗粒土	粉黏粒含量 $\leq 15\%$	< 10	< 1	不考虑	融沉稳定型冻土
	粉黏粒含量 $> 15\%$	< 12			
	细砂、粉砂	< 14			
	黏性土	$< w_p$			
粗颗粒土	粉黏粒含量 $\leq 15\%$	$10\sim 16$	$1\sim 5$	不考虑	融沉稳定型冻土
	粉黏粒含量 $> 15\%$	$12\sim 18$			
	细砂、粉砂	$14\sim 21$			
	黏性土	$w_p \leq w_n < w_p + 7$			
粗颗粒土	粉黏粒含量 $\leq 15\%$	$16\sim 25$	$5\sim 10$	≥ -1.5	不稳定型冻土
	粉黏粒含量 $> 15\%$	$18\sim 25$		< -1.5	热稳定型冻土
	细砂、粉砂	$21\sim 28$			
	黏性土	$w_p + 7 \leq w_n < w_p + 15$			
粗颗粒土	粉黏粒含量 $\leq 15\%$	$25\sim 48$	$10\sim 25$	≥ -1.5	不稳定型冻土
	粉黏粒含量 $> 15\%$	$25\sim 48$		< -1.5	热稳定型冻土
	细砂、粉砂	$28\sim 45$			
	黏性土	$w_p + 15 \leq w_n < w_p + 35$			
粗颗粒土	粉黏粒含量 $\leq 15\%$	≥ 48	> 25	≥ -1.5	不稳定型冻土
	粉黏粒含量 $> 15\%$	≥ 48		< -1.5	热稳定型冻土
	细砂、粉砂	≥ 45			
	黏性土	$\geq w_p + 35$			