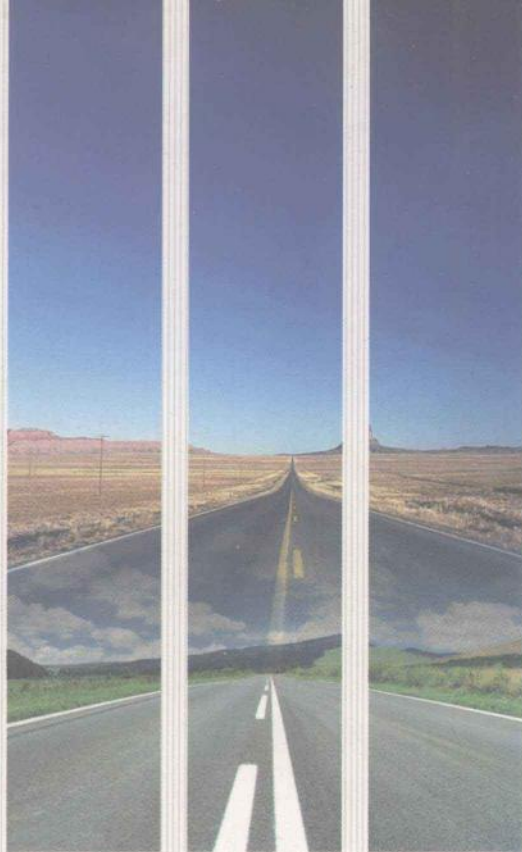


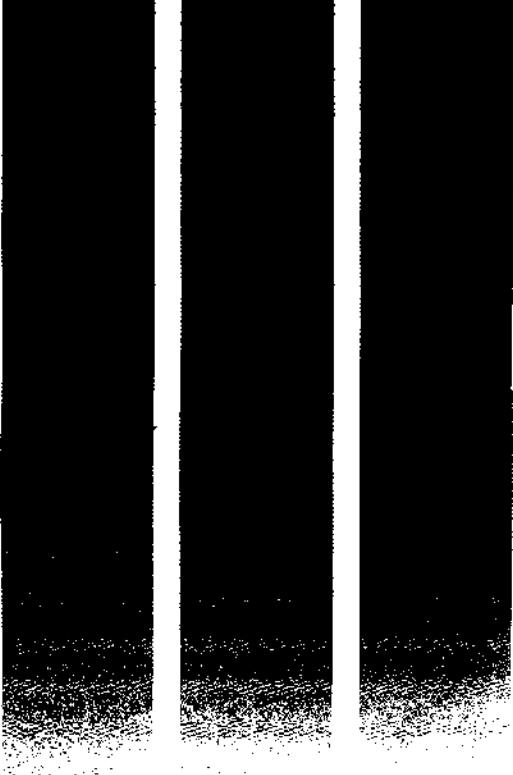


赵安平 著

季冻区路基土冻胀的 微观机理研究



黑龙江大学出版社
HEILONGJIANG UNIVERSITY PRESS



赵安平 著

季冻区路基土冻胀的 微观机理研究

 黑龙江大学出版社
HEILONGJIANG UNIVERSITY PRESS

图书在版编目(CIP)数据

季冻区路基土冻胀的微观机理研究 / 赵安平著. -- 哈尔滨: 黑龙江大学出版社, 2010.7

ISBN 978-7-81129-304-3

I. ①季… II. ①赵… III. ①冻土区-路基-冻胀-研究 IV. ①U416.1

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2010)第 122163 号

- 书 名 季冻区路基土冻胀的微观机理研究
著作责任者 赵安平 著
出 版 人 李小娟
责任编辑 陈雪峰 刘剑刚
出版发行 黑龙江大学出版社(哈尔滨市学府路 74 号 150080)
网 址 <http://www.hljupress.com>
电子信箱 hljupress@163.com
电 话 (0451)86608666
经 销 新华书店
印 刷 哈尔滨市石桥印务有限公司
开 本 880×1230 1/32
印 张 9.25
字 数 204 千
版 次 2010 年 11 月第 1 版 2010 年 11 月第 1 次印刷
书 号 ISBN 978-7-81129-304-3
定 价 28.00 元

本书如有印装错误请与本社联系更换。

版权所有 侵权必究

前 言

我国季节冻土面积约占全国国土面积的 53.5%,其中深季节冻土(冻深大于 1 m)约占全国国土面积的 1/3,主要分布于东北三省、内蒙古、甘肃、宁夏、新疆北部、青海和川西等地。可见,季节冻土的开发和利用在我国经济建设中占有重要地位。随着振兴东北老工业基地进程的推进,需要拥有一个良好的经济环境,其中道路建设是最重要的基础前提。然而季冻区道路冻胀问题一直是困扰东北地区道路建设的一个重要问题。而我国现有关于寒区道路工程方面的资料主要是针对多年冻土区的,对季节冻土区道路冻胀的研究则比较分散。因此,对季节冻土区路基土冻胀研究具有十分重要的意义,刻不容缓。

目前,此项研究已经取得了许多成果,但仍存在一些问题:首先,以往侧重于从宏观上研究影响路基土冻胀的因素;其次,以往建立的有关冻胀的模型都是在考虑宏观影响因素基础上的耦合模型,忽略了土的微观结构对冻胀的影响。实际上,已有大量事实表明,土的工程性状在很大程度上受其微观系统的控制,土宏观行为的实质是微观结构发生的一系列变化的体现。因此对路基土冻胀的微观机理进行研究,比较冻融循环过程中微观结构参数发生的变化,分析引起变化的原因,评价微观结构参数与宏观冻胀之间的相关关系,选择对冻胀影响深远的微观结构

参数,建立包含微观结构参数的冻胀模型是对现有研究的补充,是必要的和有意义的。

鉴于上述情况,本书以长春季冻区路基土为研究对象,探讨冻融循环过程中微观结构参数的变化,从微观结构上描述土冻胀的机理。在此基础上建立基于灰色关联度分析及粗糙集理论的评价模型,评价微观结构与宏观冻胀之间的关联关系。进一步探讨各微观结构参数对冻胀的影响程度,明确对冻胀影响较大的微观结构参数,最后建立包含所选微观结构参数的BP神经网络冻胀模型。

本书主要内容和成果是作者在攻读博士学位期间完成的,在此向我的恩师——吉林大学建设工程学院王清教授表示衷心感谢!在本书完成过程中,得到了吉林大学建设工程学院陈剑平教授、陈慧娥副教授的支持和帮助,他们为本书内容提出了许多宝贵意见和建议!同时得到了张鹏、车茜、张中琼等博士、硕士的帮助,使此书得以顺利完成,在此表示衷心感谢!感谢黑龙江大学建筑工程学院谢林副教授、席国强副教授、赵文军副教授等对作者在本书写作过程中的大力支持和帮助,最后,感谢黑龙江大学科技处对本书的出版资助,感谢对本书能够顺利出版给予帮助和支持的同志!

限于作者的水平和经验,书中的缺点和错误之处在所难免,敬请读者批评指正。

赵平安
2010年5月

目 录

第一章 绪 论	1
1.1 研究意义	1
1.2 国内外冻土研究概况	4
1.3 土微观结构的国内外研究现状	20
1.4 不确定性信息处理的研究方法	24
1.5 本书的主要研究内容、技术路线	34
第二章 研究区路基土的物质成分及物化性质	38
2.1 土的物质组成	39
2.2 研究区土样的化学性质	46
2.3 季节冻土的热交换参数	50
2.4 季节冻土的水力参数	57
2.5 本章小结	58
第三章 研究区土样室内冻胀试验	60
3.1 研究区路基土季节冻胀的概况	60
3.2 室内冻胀试验概况	61
3.3 室内冻胀试验结果	65
3.4 试验结果分析	69

3.5	本章小结	74
第四章	路基土微观结构的研究方法	76
4.1	引言	76
4.2	微观结构研究对象、内容及微观结构参数的 选取	78
4.3	微观结构的研究方法	86
4.4	试验仪器及微观结构样品制备	90
4.5	本章小结	93
第五章	路基土冻融过程中微观结构变化研究	94
5.1	微观结构的定性分析	94
5.2	微观结构特征的定量分析	113
5.3	本章小结	173
第六章	基于灰关联度法及粗糙集理论评价微观结构 对冻胀的影响	176
6.1	引言	176
6.2	基于灰关联度法评价微观结构对冻胀的 影响	177
6.3	粗糙集理论主要概念	195
6.4	运用粗糙集理论进行微观结构参数对冻胀的 影响评价	203
6.5	本章小结	215

第七章	基于 BP 神经网络建立包含微观结构参数的	
	冻胀模型	217
7.1	引言	217
7.2	BP 神经网络简介	218
7.3	基于 BP 神经网络建立包含微观结构参数的	
	冻胀模型	229
7.4	本章小结	259
第八章	结 语	260
8.1	结论	260
8.2	创新点	266
8.3	建议	266
	参考文献	268

第一章 绪 论

1.1 研究意义

1.1.1 冻土分布概况

当温度低于 $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时,土中液态水冻结为固态冰,冰胶结了土粒,形成一种特殊连结的土,称为冻土。根据冻结状态持续时间不同,冻土分为瞬时冻土、季节冻土和多年冻土。瞬时冻土是指冻结状态保持几小时至半月的土,季节冻土是指冻结状态保持半月至数月的土,多年冻土是冻结状态持续多年(从几年到上千年)的土。冻土广泛分布在地球表层,是一种低温地质体。冻土区有丰富的土地、森林和矿藏资源,它的存在及演变对人类的生存环境、生产活动和可持续发展具有重要影响。

• 多年冻土分布面积约占全球陆地面积的 23%,主要分布在俄罗斯、加拿大、中国和美国的阿拉斯加等地。图 1-1 是我国冻土分布图,由图中可见,我国多年冻土面积约 $206 \times 10^4 \text{ km}^2$,约占全国国土面积的 21.5%,是世界第三冻土大国,仅次于前苏联($1\ 000 \times 10^4 \text{ km}^2$)和加拿大($390 \times 10^4 \text{ km}^2 \sim 490 \times$

10^4 km^2)^[1]。我国的多年冻土主要分布在青藏高原、帕米尔高原、西部高山(包括祁连山、阿尔金山、天山、西准噶尔山地和阿尔泰山等)、东北大小兴安岭、松嫩平原北部以及东部地区一些高山顶部(包括山西五台山、内蒙古大石山和汗山、吉林的长白山和张广才岭等)。季节冻土遍布在不连续多年冻土的外围地区,主要分布于北纬 30° 以北的地区。其南界大致从云南省的挖苦河($25^\circ 14' \text{N}$, $97^\circ 52' \text{E}$)向东北方向沿着横断山脉和喀拉山脉的坡脚,经大巴山南麓向东南绕过四川盆地后,又从湖南省的咱果乡附近(29°N , $109^\circ 25' \text{E}$)向东北方向延伸,直至江苏省连云港附近($34^\circ 34' \text{N}$)。此外,在大别山、莱阳山和玉山顶部也有零星分布^[1]。

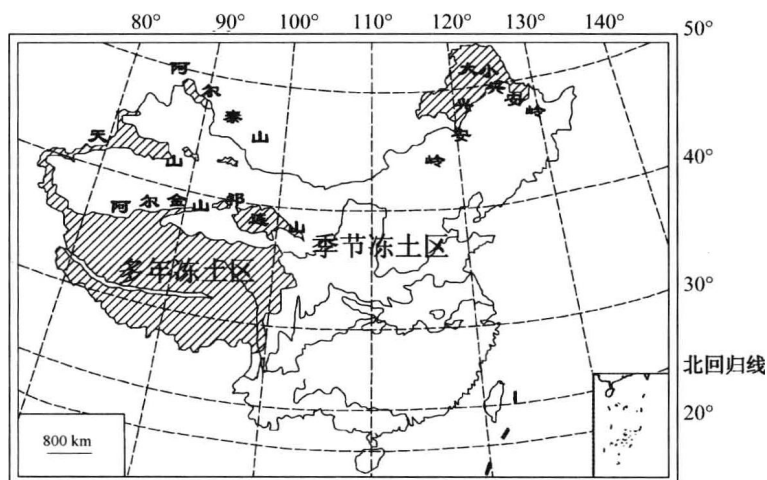


图 1-1 中国冻土的分布^[1]

1.1.2 季冻区路基土研究意义

我国季节冻土面积为 $513.7 \times 10^4 \text{ km}^2$, 约占全国国土面积的 53.5%^[2], 其中深季节冻土(冻深大于 1 m)约占全国国土面积的 $1/3$ ^[1~4], 主要分布于东北三省、内蒙古、甘肃、宁夏、新疆北部、青海和川西等地。可见, 季节冻土的开发和利用在我国经济建设中占有重要地位, 对我国自然资源开发和社会经济发展有广泛而重要的影响。季节冻土区工程建设主要涉及矿山及森林资源的开采、水利工程、铁路、公路、机场跑道、工民建, 石油输送、给水管道以及电力工程等, 所以对季节冻土的研究具有重大工程应用意义。

随着我国振兴东北老工业基地进程的推进, 需要拥有一个良好的经济环境, 其中道路建设是最重要的基础前提。东北地区快速发展势必需要在这些地区建设数量更多, 等级更高的公路。然而季冻区路基冻害问题一直是困扰东北地区道路建设的一个重要问题^[5], 而路基冻胀是道路冻害产生的最主要影响因素。由于东北地区冬季气候寒冷, 细颗粒土路基冻结产生水分集聚(即冻结面下水分向冻结面迁移)并冻结成冰, 引起路面冻胀; 春季路基解冻, 集聚的冰晶体开始融化, 由于细颗粒土排水能力差, 路基土处于饱和或过饱和状态, 承载力极低, 在交通车辆作用下容易发生路面鼓包、弹簧、断裂和翻浆冒泡等现象, 给交通运输和经济建设带来极大的危害。

路基冻害现象比比皆是, 图 1-2 为由冻胀引起冻害的照片。由此可见, 工程上迫切需要专门有效的措施, 以防治由于路

基冻胀引起的冻害问题。然而我国现有的关于寒区道路工程方面的资料主要是针对多年冻土区^[6-7],如青藏高原和黑龙江大兴安岭地区,在多年观测分析的基础上总结出一套多年冻土区路基设计方法和经验。对季节冻土区道路冻害的研究则比较薄弱,对高速公路来说就更为少见^[8]。因此,对季冻区路基土的研究具有重大的工程实际意义,刻不容缓。

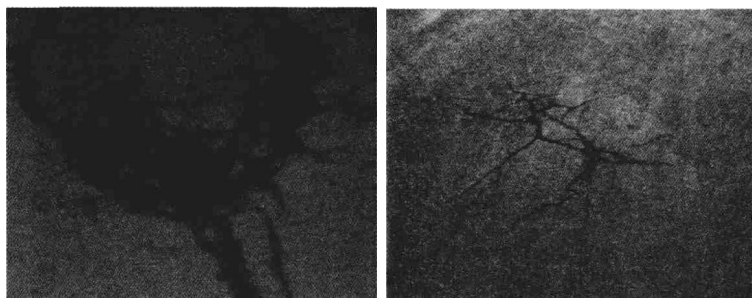


图 1-2 路基冻害引起路面破坏

1.2 国内外冻土研究概况

1.2.1 冻土研究概况

1. 国外冻土研究状况

冻土研究始于 16 世纪,当时文献中已经出现有关西伯利亚和北美存在冻土的报道。18 世纪中叶(1757 年),前苏联学者 M. B. 罗蒙诺索夫曾发表“冻土地”的科学综述,对“冻土地”的形成及其与气候、地形的关系提出看法。19 世纪上半叶,人们

已经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的资料。与此同时,报道了北美哈得逊湾深处的岩石为永久冻结,埃什绍利茨湾沿岸有很厚的地下冰体。到了19世纪后半叶,西伯利亚工农业发展尤其是铁路的修建,极大推动了冻土研究。应西伯利亚铁路建设的需要,俄国地理协会制定并出版了《西伯利亚冻土研究指南》(1895年)。在这一时期,出版了很多关于冻土的报告及书籍,分别有《论西伯利亚的永久冻土》(1889年),《永久冻土与永久冻土上的建筑物》(1912年),《阿穆尔铁路西段在永久冻土条件下供水水源的普查与勘探》(1916年)等。1917年以后,冻土研究进入有计划、有目的的发展时期,1927年前苏联学者М. И. Смутин撰写了《苏联境内的永久冻土》一书,标志着冻土学作为一门独立的学科已经问世。此后,《普通冻土学》(Смутин цдр, 1940)、前苏联科学院《冻土学原理》(Щведова, 1959年)、莫斯科大学Кудрявцев教授《工程地质研究中的冻土预报原理》(郭东信,等译,1992年)、《苏联冻土学》(1988年)等一系列专著的出版,显示冻土研究在前苏联已达到较高的深度和广度。

二战前,北美人在多年冻土地区(美国的Alaska及加拿大的Yukon Territory)开采金矿,进行了一些与道路工程有关的季节性冻土的研究。二战中,由于亚北极地区军事工程建设受到冻土问题的困扰,迫使美军军事部门成立专门研究机构,对冻土进行大规模研究^[9]。1961年美国陆军部成立寒区研究和工程试验室,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。20世纪60年代末北极海发现大量石油,20世纪70年

代 Alaska 石油管道的修建,促使冻土研究迅速发展。

1963 年,第一届国际冻土大会的召开(International Conference on Permafrost,简称 ICOP)标志着冻土研究进入了新阶段。此后从 1973 年起每隔 5 年举行一次 ICOP,交流各国冻土研究成果。1978 年加拿大举行的第三届国际冻土会议上,14 个国家的冻土学者在区域冻土、冻土现象、冻土热层等方面发表了 150 多篇论文^[10]。

1983 年,举行了第四届 ICOP,由中、俄、美、加四国倡议成立了国际冻土协会(International Permafrost Association,简称 IPA),国际冻土协会(IPA)在第五届国际冻土会议期间成立了高山冻土及冰缘过程工作组,并于 1991、1992 年分别在瑞士及加拿大举行了高山冻土及冰缘过程国际讨论会。在高山冻土与冰川、积雪及水之间的关系及相互作用方面,取得一定进展。

1993 年,在北京举行的第六届国际冻土学大会上,全球变暖成为国际冻土界关注的热点,俄罗斯学者 Bosikov 认为:冻土是寒冷气候下的地质产物,其中所含冰对温度变化十分敏感。因此气候剧烈变化以及由此引起冻土中剧烈的冰-水相变将会导致如冻胀、冻裂、地下冰融化、地表沉陷、热喀斯特、融冻作用等冷生过程的产生,从而改变冻土发展状况。而冻土状况的改变又将影响寒区生态环境及工程建设^[11]。

2003 年,在瑞士举行的第八届国际冻土大会上,阿根廷和美国学者采用物探方法对南极多年冻土带厚度和分布研究进行了交流;丹麦和加拿大学者介绍了雪基温度建立的多年冻土分布模型;德国和瑞士学者研究了瑞士阿尔卑斯山地区人类活动

对多年冻土的影响;美国和加拿大学者提出了气候影响下多年冻土模型。

2008年,5年一次的国际冻土学大会在阿拉斯加召开,我国冻土学专家程国栋院士在会上作题为《温暖冻土上建筑的创新设计》的报告,介绍我国青藏铁路冻土工程的成功创举。

2. 国内冻土研究状况

我国早在春秋战国时期就有关于季节性冻土冻结融化的记载,三国时期,古人已采用冻结法施工。但是关于冻土的研究在解放后才有起步。

解放后的十年(1949~1959年),东北冻土区地质矿藏调查、林业开发、铁路和公路修建以及工业和民用建筑物等各项生产的需要,大大促进了冻土科学研究。1956年辛奎德、任奇甲发表了《中国东北地区多年冻土分布》一文,1957年铁道部根据勘测设计大小兴安岭森林铁路的经验,出版了《多年冻土的工程地质和铁路建设》(1958年)一书;与此同时,中国科学院地理研究所(1953~1954年)和北京市市政工程设计院(1956年)进行了北京市季节冻结深度和道路翻浆观测研究;1954年青藏公路通车,青藏高原冻土问题引起交通、铁道部门的关注,1956年,铁道部开始勘测青藏线,对沿线冻土做初步调查。这段时间为我国冻土研究资料的积累阶段。

1960年,中国科学院成立冻土研究组,同铁道部高原铁路研究所一起,开展青藏公路沿线冻土综合考察。1963年,周幼吾等发表了《青藏高原冻土初步考察》一文,首次向国内外报道了青藏高原多年冻土的分布特征、温度状况、厚度、组构、地下水

及冻土地质地貌现象。1963 ~ 1964 年,中国科学院开展了唐古拉山南麓西藏土门地区冻土调查研究,并建立了世界上海拔最高(4950 m)的冻土长年观测站。1965 年,又在祁连山木里煤矿地区开展冻土和供水条件调查,并建立冻土长年观测站。同年,《青藏公路沿线冻土考察论文集》出版,对高原冻土分布及分区特征、冰缘地貌、冻土区地下水、冰的结构以及植被进行了系统总结。与此同时,中国科学院和铁道部在大兴安岭牙林铁路沿线开展冻土和工程冻害调查,并对个别严重冻害地段进行观测。1966 年,在兰州建成我国第一个有相当规模的冻土低温试验室。这一阶段结合生产实践,积累了大量冻土基本资料,野外工作已应用地球物理勘探方法,并初步开展冻土物理力学和热学性质试验,培养了一批冻土科研人员,为我国冻土研究打下了良好基础。

20 世纪 60 年代中期到 70 年代中期,中国科学院兰州冰川冻土研究所结合青海热水煤矿、格尔木至拉萨输油管道、南疆铁路等工程,作了大量现场调查和室内外试验、观测和研究工作,并积累了许多科学资料。1975 年,兰州冰川冻土沙漠研究所出版《冻土》一书,介绍冻土知识和我国以往研究成果,1978 年,我国参加第三届国际冻土学会议,并交流了论文^[12]。

20 世纪 80 年代到 90 年代,主要是进行我国冻土分布填图、冻土冻胀、冻土工程、冻土勘察等。主要研究成果包括:对区域冻土特征及其影响因素进行系统总结(1979 年);编制青藏公路沿线多年冻土分布图(1982 年);编制青藏高原冻土图(1996 年);关于天山、祁连山冻土研究包括系统总结了天山地区多年

冻土分布发育特征及温度动态(1981年);对祁连山地区多年冻土分布特征(1983年)及阿尔泰山冻土(1986年)进行了专门论述;有关东北冻土的研究,提出东北大小兴安岭多年冻土分区及特征,编制出东北多年冻土分布图(1981年);总结出大兴安岭多年冻土地温特征(1982年);明确了东北多年冻土南界位置(1993年);1983年提出了1:4 000 000中国冻土分布图的编制原则和方法,明确划出季节冻土和瞬时冻土的分界线;1990年出版了《中国冻土》一书。这些成果反映出我国30多年来区域冻土研究的进展。此后又有《土体冻胀和盐胀机理》(徐学祖、王家澄等,1995年)、《甘肃省河西走廊季节冻结盐渍土及其改良利用》(邱国庆,1996年)、《Mechanisms of frost heave and salt expansion of soils》(Xu Xiaozu, et al. 1999)、《多年冻土退化与道路工程》(臧恩穆、吴紫汪,1999年)等著作出版,以及已编和在编的《冻土地区建筑地基基础设计规范》、《冻土工程地质勘察规范》、《水工建筑物抗冰冻设计规范》及《冻土试验方法标准》等国家和行业标准的出版和即将出版。

目前,我国冻土研究在国际上占有重要地位。近几年在冻土物理、化学及力学性质研究方面取得重要进展。对冻土中溶质迁移、成冰及冻胀机理提出了一些新的概念;对土冻融过程中热、力及水相互作用数值分析和理论研究取得了新的成果;对土冻融过程中微观结构变化及其特征的研究取得新的进展;对冻土中碳氢水合物形成条件及其基本性质进行深入研究,为寒区地下能源的调查与开采提供科学依据;对冻土流变机制、屈服准则及本构关系提出新的认识;对冻土在应力作用下的微观结构