

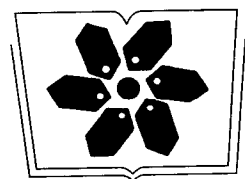
陈肖柏 刘建坤 著
刘鸿绪 王雅卿

土的冻结作用 与地基

FROST ACTION OF SOIL
AND FOUNDATION
ENGINEERING



科学出版社
www.sciencep.com



中国科学院科学出版基金资助出版

土的冻结作用与地基

陈肖柏 刘建坤 刘鸿绪 王雅卿 著

科学出版社

北京

内 容 简 介

本书较为全面系统地综合、归纳了国内外冻土力学及地基工程的基本理论与应用研究成果,即抗冻防灾的基本原理与措施。全书分基础篇与应用篇。在土冻结作用的基础篇里,重点论述冻土基本物理力学特性、冻胀机制及其判据、盐胀机制及控制、冻土融化下沉特性及计算方法、土冻结过程的冻胀力特性与计算、冻土的流变特性及其蠕变强度计算,以及土冻结时水热耦合数值模拟与应用;在地基基础应用篇中,侧重系统阐述不同冻土区的建筑原则、地基土冻结与融化深度计算、地基基础的基本设计方法,并总结了许多实践工程中简易且行之有效的抗冻措施,还较系统地阐明了容易被忽视的冻土环境与工程运营中的监测工作。此外,本书较完整地反映了我国现行规范的有关规定,并对其进行解释与阐述。

本书可供土木、水利、道路、矿山、管线等工程领域科技人员、相应专业的大专院校师生与科研人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

土的冻结作用与地基/陈肖柏等著. —北京:科学出版社,2006
ISBN 7-03-016175-0

I. 土… II. 陈… III. ①冻土物理力学性质 ②冻土地基 IV. ①P642.14
②TU471.7

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2005)第 095909 号

责任编辑:胡晓春 朱海燕 胡省英 / 责任校对:包志虹
责任印制:钱玉芬 / 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

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2006 年 1 月第 一 版 开本: 787×1092 1/16

2006 年 1 月第一次印刷 印张: 34 1/4 插页: 2

印数: 1—1 200

字数: 788 000

定价: 88.00 元

(如有印装质量问题,我社负责调换〈科印〉)



彩图 1 阿拉斯加北极地区多边形地貌 (陈肖拍摄)



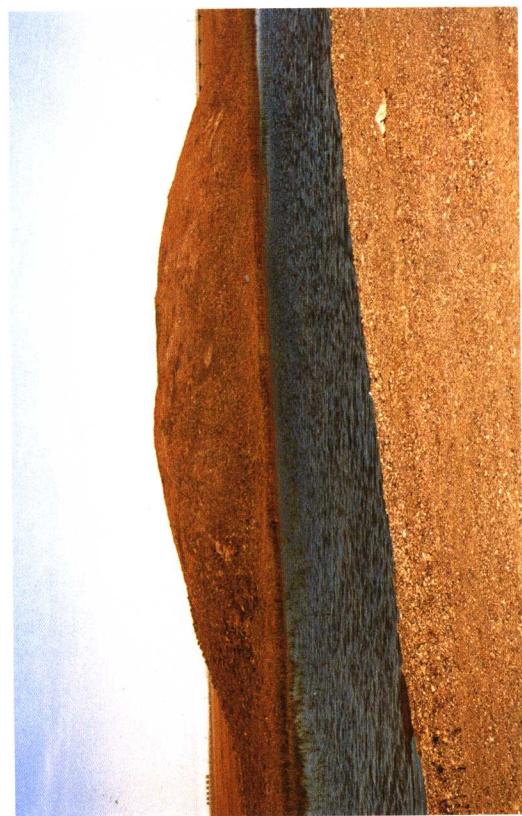
彩图 2 阿拉斯加北极地区地下冰楔 (陈肖拍摄)



彩图 3 阿拉斯加北极地区地下冰层 (陈肖拍摄)



彩图 4 阿拉斯加北极地区边坡融冻塌滑 (陈肖拍摄)



彩图 5 阿拉斯加北极地区大冰丘 (陈肖柏摄)



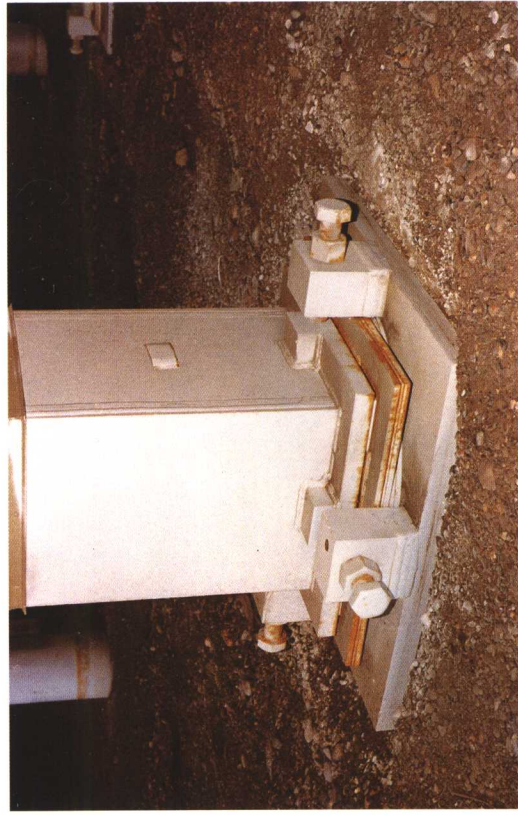
彩图 6 阿拉斯加桩架空输油管 (陈肖柏摄)



彩图 7 阿拉斯加架空式输油管 (陈肖柏摄)



彩图 8 阿拉斯加钢材架空式建筑 (陈肖柏摄)



彩图 9 阿拉斯加架空可调式基础 (陈肖柏摄)



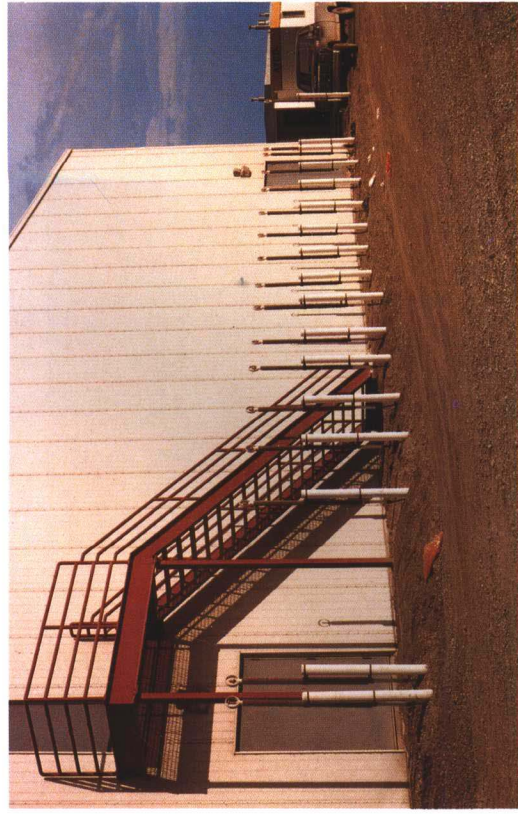
彩图 10 阿拉斯加架空式住宅建筑 (陈肖柏摄)



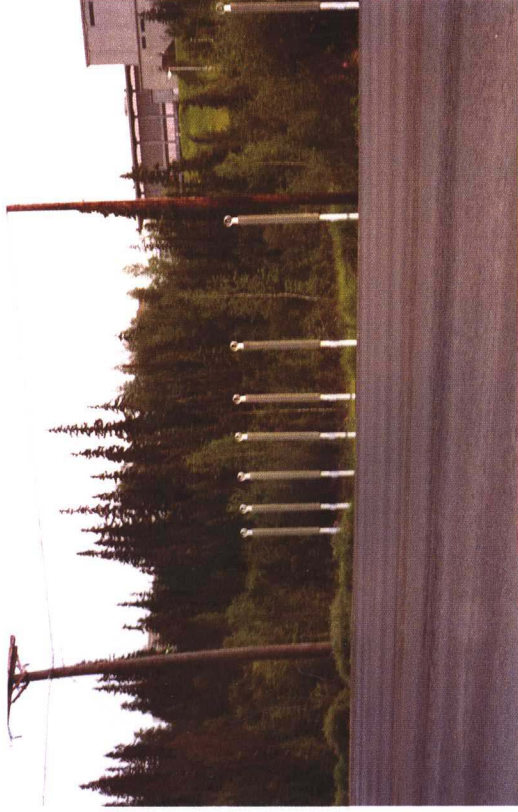
彩图 11 阿拉斯加架空式建筑群 (陈肖柏摄)



彩图 12 阿拉斯加填土架空建筑 (陈肖柏摄)



彩图 13 阿拉斯加加热管散热建筑 (陈肖拍摄)



彩图 14 阿拉斯加路基管散热 (陈肖拍摄)



彩图 15 北极基础公司的附环箍的热桩 (陈肖拍摄)



彩图 16 阿拉斯加北极区“白色”砂砾路面 (陈肖拍摄)

本书得到：

- 中国科学院寒区旱区环境与工程研究所所长基金资助
- 国家自然科学基金(50548015,40171018)资助
- 北京交通大学土木建筑工程学院资助
- 中国科学院科学出版基金资助

序

我国北方地区和西南部的青藏高原有大面积的多年冻土和季节冻土,土的冻结与融化产生一系列影响人类生产和生活的过程与现象,由此而导致冻土科学的需要与发展。20 世纪上半叶,我国冻土科学基本上处于空白状态。中华人民共和国成立以来,随着交通、水利、建筑等各方面事业的发展,中国科学院、各部委、高等院校冻土机构与研究课题的设置,特别是改革开放以来的二三十年间,冻土科学,特别在寒区工程冻害防治研究方面有了空前的发展,研究成果与论文大量发表,人才迅速成长,涌现了若干理论与实践上卓有创见、成绩辉煌的杰出专家。

经过一批在上世纪 60 年代就投身于冻土科学事业专家的努力,周幼吾、邱国庆、郭东信、程国栋、李树德合作撰写的《中国冻土学》专著,于 2000 年出版问世,该著作系统总结了新中国成立 50 多年来区域冻土学的主要研究成果,受到国内外冻土学者的普遍欢迎。如今,又非常高兴地看到由陈肖柏、刘建坤、刘鸿绪、王雅卿四位专家合作撰写的《土的冻结作用与地基》专著,这代表着他们及其同行专家们在工程冻土领域四十多个春秋辛勤劳动的成果,是其亲身实践的结晶。其出版,了却了多年的一桩心愿。

本书的第一作者,老友陈肖柏研究员自 1960 年清华大学毕业后,一直在中国科学院冰川冻土研究所(现称寒区旱区环境与工程研究所)从事冻土力学与寒区工程冻害防治研究,工作努力,富于创新思想。1994 年他主持的“土冻胀、盐胀试验研究及其在工程中应用”的成果荣获中国科学院科技进步一等奖,被《甘肃省科技周报》评为 1994 年甘肃省十大科技新闻之一,次年又获国家科技进步奖。在他退休后,仍然奋发有为,他与北京交通大学土木工程系教授、博士生导师刘建坤、黑龙江省寒地建筑科学研究院副总工程师刘鸿绪和中国科学院寒区旱区环境与工程研究所高级实验师王雅卿,共同完成了这本工程冻土学的综合性专著。

刘建坤教授是中苏关系正常化以后我国冻土界首位留苏博士,从师于世界著名冻土流变学专家维亚洛夫教授门下,回国后一直从事青藏铁路建设中冻土工程等项目的研究,培养与造就优秀人才,是位卓有成就的青年冻土学专家。刘鸿绪副总工程师 1959 年毕业于清华大学,一直从事冻土力学与寒区工程研究与实践,是我国冻土工程学界杰出的带头人之一。1994 年他主持的

“季节冻土地区建筑基础浅基研究”成果先后荣获建设部及黑龙江省城乡建设科技进步一等奖。他主持编写的我国《冻土地区建筑地基基础设计规范》于1998年出版。他在晚年疾病缠身之际,仍为本书编著花了相当心血,不幸于2003年秋辞世,实是我国冻土工程界的重大损失。王雅卿高级实验师从事冻土力学试验研究三十余年,是“土冻胀、盐胀试验研究及其在工程中的应用”成果的主要骨干,曾获中国科学院科技进步一、三等奖,国家科技进步三等奖及交通部科技进步三等奖。

本书第一篇“土的冻结作用”中,较全面、系统地阐述了冻土力学、工程冻土学的基本理论,是冻土科技工作者登高的基石;第二篇“地基基础”里,荟萃了丰硕的工程实践成果,是科技、工程人员难得的行之有效的工程范例。无疑,本书将会在占我国2/3幅员的广大冻土区的开拓中,发挥其应有的作用。

中国科学院资深院士

施雅风

2004年8月

前 言

土之冻结作用,是大自然气候周而复始变化的产物。当气温下降使表土层或土工构筑物中的温度低于土壤水冰点时,土便开始冻结,并逐渐向纵深发展。这时,土颗粒被冰胶结,强度剧增;一旦土中形成冰层或冰透镜体时,便出现冻胀,于是出现一系列有别于融土(岩)的冻土的特殊物理、化学、力学过程与性质。而当气温再度回升至 0°C 以上时,冻结的土层或土工构筑物随之开始不断融化,解冻了的土体便发生弱化作用,强度降低,甚至由于土中孔隙水无法快速排除而丧失承载力,同时发生沉降(陷)变形,或边坡滑塌现象。因此,不论是土冻结还是融化过程,土中特性的骤然变化,将严重影响到建筑物的安全。这就是本书所要讨论的内容之一。本书的另一内容是讨论在无法人为地改变外界气候的条件下,如何采取各种有效措施,尽量减轻与避免上述特殊过程与现象的发生,使寒区建筑物在地基土的冻结与融化作用过程中,尽量实现稳定可靠、安全无恙,即使有些现象不可避免,也可尽量使其损失减少。

据此,本书分两大部分,在“土的冻结作用”基础篇中包含:土冻结作用时出现的冻害现象及其对经济建设的危害、土冻结与融化过程、冻土基本物理性质、土冻结时的水分迁移作用及水热耦合数值模拟、冻胀敏感性及其判据、盐渍土盐胀特性及其控制、土冻结过程的力学性质、土冻结时的流变特性及强度特性、冻土融化下沉特性等;而在“地基基础”应用篇中,主要讨论建筑物地基的冻结与融化过程及其计算、多年冻土地基的设计、冻土区的主要基础工程、边坡与挡土墙工程、防治冻胀的实用工程措施、冻土区建筑物运行监测等。使读者较系统地了解冻结作用条件下,土中所发生的各种物理、化学与力学过程和现象,及其对工程建筑物的作用,并较全面地掌握保持冻土区各种建筑物稳定性的设计、计算方法与行之有效的基本抗冻害措施。

回顾我国冻土研究与工程实践四十余难忘的春秋,从开始引进与翻阅原苏联资料的学习,及深入广大冻土区作冻土与冻害调查的初始阶段,到建立和进行自己的室内外实验观测与系统研究,直至走向国际,并独立解决我国工程实践中的重大冻害问题,积累了大量可贵的基本资料、经验及教训。在迈进 21 世纪的前夕,我国现行国家标准《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》、《岩土工程勘察设计手册》相继问世,标志着我国工程冻土学的研究与科学技术的发展已步入比较成熟的阶段。

迄今,我国翻译的国外有关土冻结作用与地基基础方面的综合性的著作主要有:苏联崔托维奇 1973 年出版的《冻土力学》,美国裘米克斯 1955 年出版的《道路工程中的冻渗问题》,及日本木下诚一等 1982 年出版的《冻土物理学》,而我国自行编著的著作较少。

随着我国北方经济的迅速发展,很需要一本较系统反映国内外土冻结作用方面的基础理论、较全面反映寒区工程防治冻害的成就、并能结合国家现行规范进行解释与应用的综合性的著作,这就是本书写作的宗旨与目标。

四十年前投身于创业队伍的冻土科技工作者,现今多数已步入花甲,甚至近古稀之

年,总结多年甚至毕生积累之经历、心得与教训已不容等待。本书作者中的刘鸿绪先生主持编写、出版了《冻土地区建筑地基基础设计规范》后,就已病痛缠身,但仍忙于奔波,着手酝酿本书的撰著;在本书动笔不久,他已病入膏肓;直至双肾全部摘除,靠透析生存时,还在期待着本书早日成稿。呜呼!2003年秋,刘先生不幸谢世。我们忍痛执笔,加快进程,以了共同创业者的期望及刘先生的遗愿,为我国年轻的冻土科技工作者献上一块垫脚石,为减轻与防治我国广大冻土区的工程冻害尽份责任。

在本书撰写和出版过程中,中国科学院寒区旱区环境与工程研究所施雅风院士(原中国科学院兰州冰川冻土研究所创始者、老所长),王涛所长和科技管理处等领导,及北京交通大学土木建筑工程学院隧道与岩土工程研究所所长、中国工程院王梦恕院士予以很大的鼓励、关心与支持;黑龙江省交通厅科技顾问戴惠民教授级高级工程师、黑龙江省引嫩工程管理处处长彭旭明教授级高级工程师、水利电力部西北水利科学研究所总工程师唐仑教授级高级工程师对本书予以很大的关心与支持;中国科学院寒区旱区环境与工程研究所叶柏生研究员和郭学军博士对本书的撰写工作给予了帮助;全书插图由祝国存工程师描绘。谨此一并表示由衷的感谢。

将本书奉献给我国从事或有志于投身冻土科技事业的工作者与工程建设者!

陈肖柏

2004年9月

目 录

序 前言

第一篇 土的冻结作用

第一章 寒区工程冻害概况	3
一、冻害概述	3
二、多年冻土灾害	4
三、季节冻土灾害	10
第二章 冻土分布及基本特征	18
一、全球冻土分布	18
二、我国冻土分布概况	18
三、土的季节冻结与融化计算方法	19
四、季节冻结深度	23
五、季节融化深度	33
第三章 冻土基本物理性质	40
一、冻土基本组成	40
二、冻土中水的形态	42
三、土中孔隙水的冻结特征	44
四、冻土中未冻水含量与冰含量间的动力平衡	46
五、冻土基本物理指标	48
第四章 土冻结时的水分迁移机制与模型	51
一、土冻结时的水分迁移与冻胀现象	51
二、Taber 和 Beskow 对冻胀机制的研究	51
三、抽吸力理论	53
四、毛细理论	55
五、Miller 第二冻胀理论	55
六、关于分凝势及其应用	56
七、低温相的土壤水特性	59
第五章 土冻结时的水热耦合迁移模型及数值模拟	62
一、概述	62
二、土壤水动力学基本方程	62
三、土壤中的热流及基本方程	65

四、冻结时土壤中水热耦合迁移方程	66
五、土壤冻结时水热耦合迁移数学模型的数值模拟	69
六、土壤水分特征参数	71
七、土壤热特性参数	73
八、土冻结时水热耦合迁移数值模拟举例	81
第六章 土冻胀敏感性	101
一、土冻结时的冻胀现象及冻胀力	101
二、冻胀机制	104
三、土冻胀的主要影响因素	116
第七章 土冻胀性判据及评估	132
一、土冻胀敏感性及其判据	132
二、我国及俄罗斯的地基土冻胀性分类	149
三、冻胀沿冻结深度的分布	155
四、土冻胀量的估算	158
第八章 硫酸盐渍土盐胀敏感性及其应用	170
一、硫酸钠温度变化时的主要特性	171
二、土壤水的冻结温度	172
三、盐胀及其成因	177
四、影响硫酸盐渍土盐胀的主要因素	183
五、盐胀影响深度	194
六、对硫酸盐渍土盐胀性的抑制作用	196
七、降升温冻融循环后的无侧限抗压强度	204
八、公路工程中盐渍土的盐胀性评价	205
第九章 土冻结过程的力学特性	208
一、冻胀力的宏观分类	208
二、垂直法向冻胀力	209
三、切向冻胀力	219
四、水平冻胀力	232
五、采暖房屋地基冻胀力	243
六、冰压力模型试验	251
第十章 冻土力学性质	254
一、冻土力学特性	254
二、冻土蠕变方程	259
三、冻土长期强度	265
四、冻土地基承载力	273
五、冻土与基础间的冻结强度	284
第十一章 冻土融化沉降	297
一、土冻结及随后融化时压缩性变化	297

二、冻土融化压缩沉降	299
三、总融化沉降量的计算(俄罗斯法)	301
四、基本参数	303
五、冻土融化沉陷计算的实用法(美国)	312
六、一维融化固结	319
七、多年冻土融沉性分类	327

第二篇 地基基础

第十二章 建筑物地基的冻结与融化	333
一、建筑物地基中的热状态的变化	333
二、季节冻土区采暖建筑物地基冻结深度	333
三、季节冻土区道路工程冻结深度	337
四、季节冻土区渠系工程冻结深度	339
五、多年冻土区采暖建筑物地基融化深度	339
六、多年冻土区路堤下冻土上限的变化	358
七、土体冻结过程的热状态分析	372
第十三章 多年冻土地基设计	376
一、地基设计原则	376
二、多年冻土地基的计算	384
第十四章 基础工程	390
一、基础类型及其适用性	390
二、冻胀敏感性地基上基础的稳定性检算	398
三、多年冻土上的通风基础	407
四、热桩、热管(棒)基础	421
五、热力调节路堤及其应用	434
第十五章 冻土区边坡及挡土墙工程	442
一、边坡稳定问题	442
二、挡土墙	446
三、锚定与土工加筋挡土墙	456
第十六章 防治冻胀的实用工程措施	469
一、斜面式基础	469
二、强夯加固地基土	473
三、砂砾石或粗、中砂垫层	478
四、风积砂垫层	488
五、EPS 泡沫保温板	494
六、薄膜隔离填土地基	498
七、弱化土与基础间的相互作用	500

八、增加孔隙水黏滞性	505
九、渠道薄膜衬砌结构	508
第十七章 冻土与建筑物间相互作用监测	513
一、监测与建筑物的安全	513
二、监测系统	515
三、监测系统的组织实施	516
四、工程补救措施	518
主要参考文献	521

FROST ACTION OF SOIL AND FOUNDATION ENGINEERING

Chen Xiaobai¹ Liu Jiankun² Liu Hongxu³ Wang Yaqing¹

(1. Cold and Arid Regions Environmental and Engineering Research Institute, CAS;

2. Beijing Jiaotong University; 3. Heilongjiang Cold Regions Construction Academy of Sciences)

CONTENTS

Foreword

Preface

First part Frost Action of Soils

Chapter I Cold regions engineering frost damage	3
1. Introduction of frost damage	3
2. Frost-thawing damage in permafrost areas	4
3. Frost damage in seasonal frost areas	10
Chapter II Frozen ground distribution and its basic characters	18
1. Global permafrost distribution	18
2. Distribution of frozen ground in China	18
3. Calculation method for depth of seasonal freezing and thawing	19
4. Depth of seasonal freezing	23
5. Depth of seasonal thawing	33
Chapter III Basic physical properties of frozen soils	40
1. Basic compositions of frozen soil	40
2. Water shapes in frozen soil	42
3. Freezing characters of pore water in soils	44
4. The Dynamic balance between unfrozen water content and ice content	46
5. Basic physical indexes of frozen soils	48
Chapter IV Water migration in soils during freezing	51
1. Water migration in soils during freezing and frost heaving phenomena	51
2. Frost heaving mechanism proposed by Taber and Beskow	51
3. Absorption theory	53
4. Capillary theory	55
5. Secondary frost heaving theory proposed by Miller	55