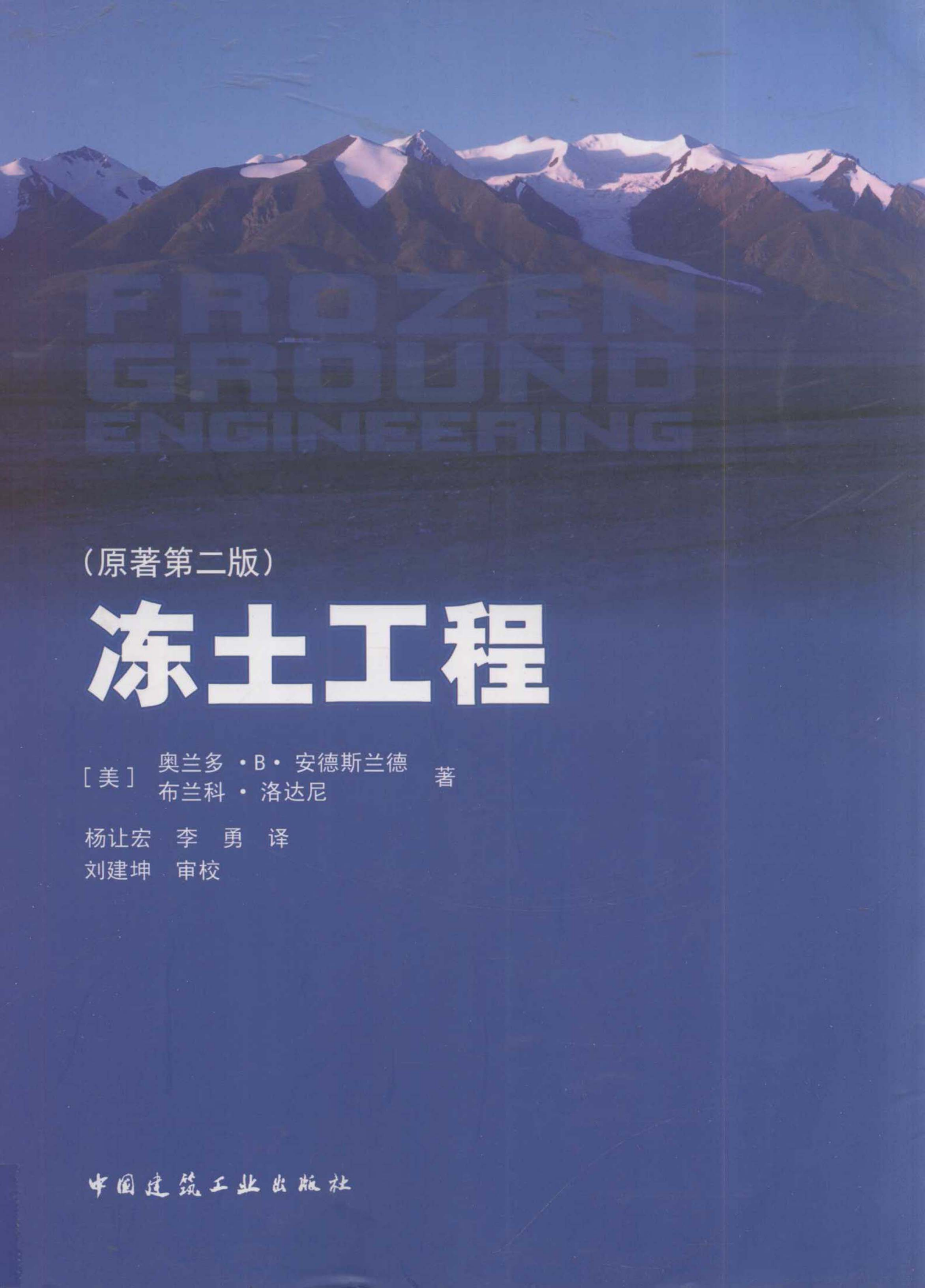




FROZEN
GROUND
ENGINEERING

(原著第二版)

冻土工程

[美] 奥兰多·B·安德斯兰德 著
布兰科·洛达尼

杨让宏 李 勇 译
刘建坤 审校

中国建筑工业出版社

(原著第二版)

冻土工程

[美] 奥兰多·B·安德斯兰德 著
布兰科·洛达尼

杨让宏 李 勇 译
刘建坤 审校

中国建筑工业出版社

著作权合同登记图字：01-2009-1981 号

图书在版编目 (CIP) 数据

冻土工程 (原著第二版) / (美) 安德斯兰德等著; 杨让宏, 李勇译. —北京: 中国建筑工业出版社, 2011. 7

ISBN 978-7-112-13252-2

I. ①冻… II. ①安… ②杨… ③李… III. ①冻土区-岩土工程
IV. ①TU4

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2011) 第 093000 号

Frozen Ground Engineering, 2nd Edition/Orlando B. Andersland, Branko Ladanyi, —9780471615491

Copyright © 2004 by The American Society of Civil Engineers, John Wiley & Sons, Inc.

Chinese Translation Copyright © 2011 China Architecture & Building Press

All rights reserved. This translation published under license.

没有 John Wiley & Sons, Inc. 的授权, 本书的销售是非法的

本书经美国 John Wiley & Sons, Inc. 出版公司正式授权翻译、出版

责任编辑: 刘婷婷 董苏华

责任设计: 陈 旭

责任校对: 肖 剑 关 健

冻土工程 (原著第二版)

Frozen Ground Engineering

[美] 奥兰多·B·安德斯兰德 著

布兰科·洛达尼

杨让宏 李 勇 译

刘建坤 审校

*

中国建筑工业出版社出版、发行 (北京西郊百万庄)

各地新华书店、建筑书店经销

北京红光制版公司制版

北京圣夫亚美印刷有限公司印刷

*

开本: 880×1230 毫米 1/16 印张: 25½ 字数: 805 千字

2011 年 7 月第一版 2011 年 7 月第一次印刷

定价: 80.00 元

ISBN 978-7-112-13252-2

(20683)

版权所有 翻印必究

如有印装质量问题, 可寄本社退换

(邮政编码 100037)

译者序

本书是作者在攻读博士学位期间拜读的一本外文优秀巨著。原著理论研究深入全面，语言阐述简洁明了，并且运用大量的试验数据和图片对一些典型冻土工程实例进行了介绍，使读者很容易接受和领会，是一本将冻土工程理论与现场实践经验紧密结合的不可多得的专业书籍。译者深受该书内容以及作者研究冻土工程的严谨思路与方法吸引，爱不释手，怀着无比崇敬的心情多次拜读，受益匪浅，不敢自私，征求原著者同意后将其译成中文，以飨读者，与各位同行分享。

《Frozen Ground Engineering》第二版在总结第一版教学研究及现场经验的基础上，对部分章节内容进行了改进，并结合冻土工程现场实际添加了路面结构的内容，基本反映了当前美国、加拿大等发达国家在冻土工程领域的研究和试验水平。

冻土作为一种特殊土类型，其形成和作用环境具有其独特的地形地貌特征和工程特性，工程师在建筑设计时必须掌握冻土的冻结过程、冻土融化的影响、季节冻胀及融沉等问题，以及如何利用冻结状态岩土性质的稳定性、高强度、隔水性等有利方面。该书运用理论与现场试验紧密结合的方法向读者清晰地阐述了这些问题。具体章节内容涵盖了冻土的物理力学基本理论、热作用过程及其融化特性、冻土工程结构及其内部作用机理，现场勘察分析、监测方法等，并且包括了冻土对于气候的敏感性，冻土的蠕变和强度试验，冻结边坡蠕变变形的监测以及运用隔热层对基础的保护等冻土界特别关注问题的当前研究成果及其发展前沿。章节编排由浅及深，不仅可以作为冻土专业理论学习的教材，而且也可以作为现场从事冻结土事业（包括软土地区地下工程中的冻结法研究）的不同层次专业技术人员的重要参考资料。

时逢中铁西北科学研究院有限公司（原铁道部科学研究院西北分院）建院50周年庆典，译者利用工作之余，仓促将译稿整理成册，作为中铁西北院院庆的微薄一礼。同时感谢中铁西北科学研究院有限公司出版基金的支持。

由于时间仓促，译文中错误在所难免，希望各位前辈、同行多提宝贵意见和建议，本人悉听指教，共同探讨。本书译稿第1至第8、第10、第11章由杨让宏翻译，第9章由李勇翻译，刘建坤老师校稿，全书最终由杨让宏统稿、审定。在此，对在翻译过程中给予支持的各位同行表示谢意。

译者

2011年6月

前 言

在总结第一版对冻土工程专业毕业班学生的教学和现场经验的基础上,原著第二版对有关章节和部分内容进行了改进。全书中基本遵循第一版的内容顺序,只是对大部分章节进行了修改,添加了新的内容。根据许多学者对第一版的使用情况要求,新增了一章路面结构的内容。另外新的参考向导更加有利于对特别章节的研究。

新的内容包括冻土对于气候的敏感性,冻土蠕变和强度试验,冻结边坡蠕变变形的监测以及运用隔热层对基础的保护。新增第 11 章关于路面结构,包括了季节冻结和永久冻结区的设计模型。其他章节包括高速公路的隔热层,荷载约束以及特殊问题。附录 C.7 关于冻土的水力学传导说明了冻土中控制液体污染和量测的局限性。其他的变化包括增加了大部分章节和修正。另外参考附录提供了关于新内容、修正和计算机程序的更深信息,包括三维冻深预测、通过模型模拟进行路面结构设计,基础设计和其他。

作者对同行关于第一版的建议和意见表示感谢。许多建议被一同汇集到本版中。Suzanne Coladonato 和美国土木工程师协会在再版过程中给予了很大的支持,一并表示感谢。同时感谢 Phyllis Andersland 为新的和修正的参考文献进行了校正。

奥兰多·B·安德斯兰德 (Orlando B. Andersland)

布兰科·洛达尼 (Branko Ladanyi)

第 一 版 前 言

《冻土工程》这本书首先介绍了作为工程材料的冻土的冻结环境及其特性。在随后的章节中，这些信息被用来分析和设计地下支撑系统，基础、堤坝等。这本书的内容可作为土木工程冻土专业的三年级或四年级学生的专业基础学习课程。学习这本书的学生首先需要具有实践力学知识（静力学和材料力学）和地质工程（通常至少两年的经历）方面的知识。了解基本地质知识将是很有用的，但不是必要的。这本书将对其他学科的学生或者从事冻土工程工作的工程师来说是一本具有参考意义的冻土工程技术参考资料。

背景

在过去的几十年，由于现场实际需要，冻土工程事业发展迅速。涉及冻土的实际问题也越来越多，早期处理方法的缺点日益突出。地下冻结技术的成熟使得地基冻结方法的应用逐渐增多。冻结技术对于临时土支撑系统、复杂土或岩层中控制地下水、地下水整治项目中污染边界的控制等来说是非常有用的。

世界寒区能源的开发和建筑结构的需要极大地增加了对于冻土工程的研究投入。这些有助于促进诸多冻土问题的研究。在许多专业出版物中均有描述。这些对于永久冻结区的基础和土结构研究涉及土材料的物理和热材料属性，例如临时冻土支撑系统的设计。需要运用许多分析技术来对结构基础冻结及寒区工程问题进行稳定和变形分析。

内容安排

在定义了冻土之后，首先介绍给读者作为临时土支撑的冻结地下支撑系统，包括竖井、隧道和深开挖。另一个主要应用领域是关于世界寒区的季节和永久冻土。第2章我们继续讲述物理和热雪特性，包括土的成分组成，冰的信息和相互作用，冻土中未冻结水和冻融特性。描述了冻土的分类系统。土中热流（第3章）包括地表热传导、活动层的季节冻结和活动层以下地层温度的变化。在第3章的最后，描述了对建筑冻结项目的热分析。

第4章冻土融化特性的介绍包括融化沉降和一维融化固结，及其冻结土系统融化固结的应用。第5章介绍了冻土的力学特性，包括应力-应

变-时间（蠕变）关系，蠕变和强度数据、单轴拉伸特性的分析表示。有侧限压缩土层涉及弹性行为和高温冻结土的固结。有关力学属性的温度效应方便描述几个经验关系。

本书的其他章节直接讲述工程设计问题。第6章首先为建筑地基的冻结、设计方面的考虑、冻结方法和冻结墙的结构设计，包括墙的监测和结构考虑。第7章提供了在永久冻结土中或其上的基础信息。描述了浅基础和桩基础。包括冻土中承受侧向荷载的桩和锚杆。

第8章描述了土体的稳定性，包括永冻区自然边坡融化和建筑位置的冻土新边坡。这两种情况，边坡稳定性包括了表面扰动的不同控制方法。第9章土方工程包括寒区环境中土方设计，土的开挖、运输和放置。大多数现场项目需要土的条件和地温。在第10章中描述了怎样获取冻土试样。初始温度的测量和现场试验方法。可以采用地球物理方法更深的描述永久冻土的限值和结构的冰体。

学习帮助

全书中提供了许多完整的工程实例，连同许多章节之后的问题。教师解题手册提供了所有章节的全部问题的解。为了方便读者，工程属性涵盖了大部分土、岩和建筑材料内容。附录A列出了所有符号。全书中采用国际单位制。附录B提供了换算指南，包括基本单位，SI词头和导出单位，换算系数按照字母顺序排列。因为文章中的内容需要对现场试验和室内试验有总体的了解，在附录C中给出了简单描述的新的方法。为了方便获得大量的索引原出处，作者在索引中提供了完整的参考资料。书后的主题索引有助于更快查找不同主题在书中的位置。

感谢

作者的许多同事和学生对此书具有重要贡献，在此表示感谢。感谢所有作者和出版者提供的图表。书中每张图片 and 表格均给出了出处。作者感谢 Francis H. Sayles 对于第6章和9. J. F. (Derrick) Nixon 在第2章和第4章提供的许多有意义的建议。John P. Zarling 给出了材料和评论使用热虹吸管的技术。Richard Fortier 提供了第10章地球物理中的部分内容。Phyllis Andersland 验证和准备了参考列表和作者索引，在此一并表示感谢。

奥兰多·B·安德斯兰德 (Orlando B. Andersland)

布兰科·洛达尼 (Branko Ladanyi)

1994年1月

目 录

译者序

前言

第一版前言

第 1 章 冻土	1
1.1 冻土支撑系统	1
1.1.1 冻结土墙	1
1.1.2 设计时应考虑的问题	2
1.2 季节冻土和多年冻土	3
1.2.1 寒区	3
1.2.2 地表以下温度	5
1.2.3 活动层	6
1.2.4 多年冻土	7
1.3 多年冻土区的地形特点	9
1.3.1 地下冰特征	9
1.3.2 成型土	12
1.4 工程考虑因素	13
1.4.1 冻结过程	13
1.4.2 冻土的融化	14
1.4.3 冻融作用	15
1.4.4 冻土的有利方面	15
1.4.5 冰作为一种建筑材料	16
讨论	18
第 2 章 物理和热学属性	19
2.1 冻土的组成和结构	19
2.1.1 土的类型	19
2.1.2 各相之间的关系	20
2.1.3 冰相	23
2.1.4 土颗粒大小及其粒径分布	24
2.1.5 黏性土的稠度	26
2.2 土的分类	27
2.2.1 标准土分类系统 (USCS)	27
2.2.2 冻土分类	30
2.3 冰-水相之间的关系	33
2.3.1 冻土中的未冻结水	33
2.3.2 盐分对冻结的影响	35
2.4 土中冻融作用	36

2.4.1 冻融作用过程	37
2.4.2 土的冻融敏感性	38
2.4.3 冻胀力	44
2.4.4 冻融作用对于渗透性的影响	45
2.5 热学属性	46
2.5.1 热传导性	46
2.5.2 热容	52
2.5.3 热扩散性	53
2.5.4 熔化潜热	54
2.5.5 热膨胀 (或收缩)	54
讨论	56
第3章 土中热流	58
3.1 地表的热传输	58
3.1.1 气候因素	58
3.1.2 冻结 (或融化) 指数	60
3.1.3 表面 n -因子	62
3.2 季节性冻结 (或融化)	63
3.2.1 修正 Berggren 方程	64
3.2.2 Stefan 解	67
3.3 冻融保护和隔热	70
3.3.1 临界等温线	70
3.3.2 隔热属性及应用	71
3.4 冷却区 (或加热区) 下的温度	76
3.4.1 稳态热流	76
3.4.2 瞬态温度	83
3.4.3 周期性热流	83
3.5 热学分析: 冻土支撑体系	86
3.5.1 单个冻结管	87
3.5.2 墙的形成	90
3.5.3 多排冻结管	92
讨论	92
第4章 冻结地基的融化特性	96
4.1 融化沉降	96
4.2 正融土的固结	100
4.2.1 融化固结	100
4.2.2 正融土中的残余应力	103
4.3 多层土系统中的融化固结	107
4.3.1 两层土问题	107
4.3.2 不连续冰层之上的可压缩土	109
讨论	113
第5章 冻土的力学属性	115
5.1 应力-应变-时间和强度特性	115
5.1.1 静压力对冻土特性的影响	115

5.1.2 剪应力对于冻土特性的影响	116
5.2 影响蠕变和强度的因素	117
5.2.1 常应力条件下的冻土蠕变	117
5.2.2 常应变率下的应力--应变特性	119
5.2.3 含冰量对于强度的影响	120
5.2.4 正压力对于强度的影响	121
5.2.5 应变率对于强度的影响	122
5.2.6 温度对强度的影响	123
5.2.7 低温的冻土特性	124
5.3 蠕变和强度数据的分析描述	126
5.3.1 一般蠕变方程	126
5.3.2 冻土的强度	131
5.3.3 Vyalov 的蠕变和强度方程比较	133
5.3.4 正应力对蠕变和强度的影响	134
5.3.5 盐分对于冻土蠕变和强度的影响	137
5.4 单轴拉伸下的冻土特性	139
5.5 冻土的可塑性	140
5.6 冻土的可压缩性	142
5.7 冻结地基对于气候改变的敏感性	142
5.7.1 冻土强度对温度改变的敏感性	143
5.8 冻土蠕变及强度：试验数据的总结	145
讨论	148
第 6 章 冻土路基施工	150
6.1 设计中应考虑的问题	150
6.1.1 地基冻结法的应用	150
6.1.2 土体条件	152
6.1.3 地下水流动	153
6.1.4 地下水质量	153
6.1.5 土体位移	154
6.2 冻结方法及系统安装	156
6.2.1 主要设备和辅助泵循环冷却液	156
6.2.2 消耗性冷却液	157
6.2.3 冷却系统安装	158
6.3 冻结土墙的结构设计	160
6.3.1 曲线墙	161
6.3.2 直线墙及其相关组合	167
6.3.3 隧道	168
6.3.4 有限单元方法	169
6.4 监控要求	170
6.4.1 冷冻口的偏移量	170
6.4.2 温度	171
6.4.3 冻融边界位置和墙的厚度	174
6.5 其他施工考虑	174
6.5.1 暴露冻土的保护	174

6.5.2 依靠冻结土的混凝土浇筑	175
讨论	176
第7章 冻土中的基础	177
7.1 一般考虑	177
7.1.1 季节性冻土中的基础	177
7.1.2 多年冻土中的基础	179
7.2 浅基础	182
7.2.1 地基选择的方法	182
7.2.2 浅基础设计	185
7.2.3 承载能力	186
7.2.4 沉降需考虑的问题	189
7.3 桩基础	195
7.3.1 桩的类型	195
7.3.2 桩的设置	196
7.3.3 桩的回冻	198
7.3.4 轴向承载桩	201
7.3.5 横向受荷桩	214
7.3.6 锚固冻土	215
7.4 基础上的冻胀力	217
7.4.1 垂直表面上的切向力	218
7.4.2 桩的隆起取决于冻结作用	218
7.4.3 冻胀设计	224
7.5 运用地基隔热层进行基础的冻融保护	224
7.5.1 Slab-on-grade 基础	225
7.5.2 有通风结构或地下室的基础	227
7.5.3 不加热建筑物的冻融保护	228
7.5.4 设计冻结指数	233
7.5.5 开放型基础	234
7.5.6 挡土墙和桥梁基础	235
7.5.7 挡土墙上的水平冰冻力	236
讨论	237
第8章 寒区土体的稳定性	239
8.1 多年冻土中滑坡：分类	239
8.2 正融多年冻土斜坡	240
8.2.1 低角度平面流动	240
8.2.2 滑动	243
8.3 冻结土斜坡	243
8.4 冻结斜坡的蠕变监测	245
8.4.1 倾斜仪的安装	245
8.4.2 典型结果	245
8.4.3 净下移量	246
8.5 斜坡稳固方法	248
8.5.1 建筑和设计技术	248
8.5.2 平面滑动的稳定性	248

8.5.3 切坡的稳定性	249
讨论	252
第9章 寒区的土方工程	253
9.1 现场需要考虑的问题	253
9.1.1 排水	253
9.1.2 热量以及冻融作用因素	255
9.1.3 地下条件	256
9.1.4 材料来源	256
9.2 挖掘和搬运	258
9.2.1 机械开挖	258
9.2.2 钻孔和爆破	263
9.2.3 冻土的融化	264
9.2.4 水力挖掘	268
9.3 现场设置	268
9.3.1 压密作用	268
9.3.2 在水中置放	270
9.4 多年冻土上的挡水堤	271
9.4.1 未冻结堤坝	271
9.4.2 冻结堤坝	272
9.4.3 保持冻结状态	273
9.4.4 热和稳定性考虑	273
9.5 堤坝的性能	274
9.5.1 冻胀	274
9.5.2 沉降	275
9.5.3 稳定性	276
9.5.4 人工岛	276
第10章 现场勘查	278
10.1 冻土取样	278
10.1.1 取样方法	279
10.1.2 样品保护	280
10.2 地温观测	281
10.2.1 温度传感器和量测设备	281
10.3 冻土的现场试验	282
10.3.1 现场测试方法	282
10.3.2 压力计试验	283
10.3.3 深部静力触探试验	293
10.3.4 其他现场测试	295
10.4 地球物理学方法	296
10.4.1 冻土中的地震波速度	297
10.4.2 冻土的电属性	298
10.4.3 地球物理技术在冻土中的应用	298
10.4.4 高频电流方法	302
10.4.5 多年冻土中钻孔探测	304

第 11 章 路面结构	307
11.1 季节冻融区	307
11.1.1 力学模型	307
11.1.2 限制路基冻融深度法	308
11.1.3 降低地基强度法	310
11.1.4 AASHTO 准则法	311
11.1.5 基底层构成	313
11.1.6 路基施工准备	314
11.2 多年冻土区	316
11.2.1 融化保护	316
11.2.2 降低地基强度法	317
11.2.3 不敷路面道路	317
11.3 公路保温材料	318
11.3.1 设计要求	318
11.3.2 施工方法	319
11.3.3 差异冻结现象	321
11.3.4 地下管道	321
11.4 限制荷载	323
11.4.1 路面部分	323
11.4.2 何时施加	324
11.4.3 限制荷载的数量	326
11.4.4 限制荷载的持续时间	327
11.5 特殊问题	327
11.5.1 纵向裂缝	327
11.5.2 沥青混凝土路面的热学裂缝	328
11.5.3 薄膜囊盛土层	330
11.5.4 富冰的永久冻土	332
讨论	333
附录	334
附录 A 注释	334
附录 B SI 单位	343
附录 C 冻土试验室和现场测试	348
C.1 试验前土样的采取、存储与制样	348
C.2 单轴压缩试验	350
C.3 单轴拉伸试验	352
C.4 土孔隙水含盐度	354
C.5 热虹吸管	355
C.6 多年冻土中的桩载荷试验	359
C.7 冻土的水力传导率	363
参考文献	366

第 1 章 冻 土

冻土即温度低于 0°C 的土或岩石。这个定义完全建立在温度的基础上而没有考虑岩土中水和冰的含量。工程师们在有关冻土工程的建设中通常利用土在冻结时强度急剧增大这一特性。冰作为胶结材料，将相邻土颗粒或岩块体胶结连接而结构体的强度增大，同时降低其透水性。所以，使得开挖和其他工作可以在强度高并且隔水性好的冻结墙内或一侧安全进行。在寒区，多年冻土（或永久冻土）的温度持续多年保持低于 0°C 。冻土中的水分有水和冰两种形式，其可能存在也可能不存在。季节性冻土的温度仅在冬季低于 0°C 。在北半球，寒区的南界一直延伸到大约北纬 40° 。工程师们定义南界采用的标准是季节冻结土的冻结深度为 300mm。

与多年冻土有关的典型地形地貌特征有多种。最重要的几种为冰楔及冰楔多边形、冻胀丘、热喀斯特地形。这些地形地貌特征非常重要，因为它们反映了冻土区几种特殊地貌的形成过程，包括冻结作用、成型土以及物质坡移（地基表面物质由于重力作用而向下移动）。在这些特征地形下的复杂冰川地层关系到建筑工程的困难程度和昂贵的工程造价等一系列冻土区的建筑问题。因此，工程师在建筑设计时必须掌握冻土的冻结过程，冻土融化的影响、季节冻胀及融沉等问题，以及怎样利用冻土性质的有利方面。在冻土结构建设中，能够利用的冻土有利特性包括其稳定性、高强度、隔水性等。在寒区，多年冻结土可以提供足够的承载能力来支撑结构荷载。为了在冻土工程设计中很好地利用这些性质，必须进行一些预防措施，最显著的是保持冻土呈冻结状态。

1.1 冻土支撑系统

利用地基土冻结而形成土支撑系统的方法被广泛采用。这些支撑系统被应用于不同的建设问题处理当中，包括深部开挖施工中的冻结土墙支撑、基础结构的补强加固以及临时控制建筑项目中的地下水等。在冻土区要完成一个工程项目，结构和热学设计需要考虑的内容涉及土的类型、地下水条件、有关土冻结过程中地基的运动以及可能发生的融沉等诸方面。

1.1.1 冻结土墙

如图 1-1 (a) 中所示，冻结土结构是通过安装冻结管（冷却介质经由冻结管内孔道流下，并且从相邻冻结管间的土介质中返回，而达到使土冻结的目的）而形成的。冷却介质由位于施工现场的制冷厂提供。热从土中流失致使土的温度降低至 0°C ，从而使自由水转变为冰，同时也可使冻结土温度得到更进一步地降低。开始时，在每个冻结管的周围形成冻结土圆柱体。随着热量的继续不断流出，冻结圆柱体直径不断增大，直到相邻冻结圆柱体相互连接形成一面冻结墙。如图 1-1 (a) 中所示，在井筒开挖范围的周围形成了一个环形墙。开挖最大边界可能包括冻结墙的一小部分，使冻结墙面呈现一个光滑的冻结土表面。在施工过程中，通常采用保温毯或喷射泡沫在这面墙的表面形成隔热层来防止冻结墙融化退化和冻结墙体可能发生的崩落。井筒的混凝土衬砌可以直接紧接在冻结土或隔热层内设置。对于较深井筒的开挖施工，通常采用拼装预制混凝土衬砌段来节省施工时间。

工程师可根据拟建结构的几何形式和现场具体的可利用空间，选择设计所需的开挖界限和冻结土墙支撑系统。由于冻土具有较高的抗压强度和较低的抗拉强度，最优的选择通常为弯曲的拱形墙，特别是圆形冻结墙。对于矩形结构，如果长宽比不超过 2，采用椭圆形结构将是非常有效的。如果受现场空间或者其他条件的限制不能够使用曲线形式，则可以采用选用其他结构设计，如直线形墙或者更为复杂形

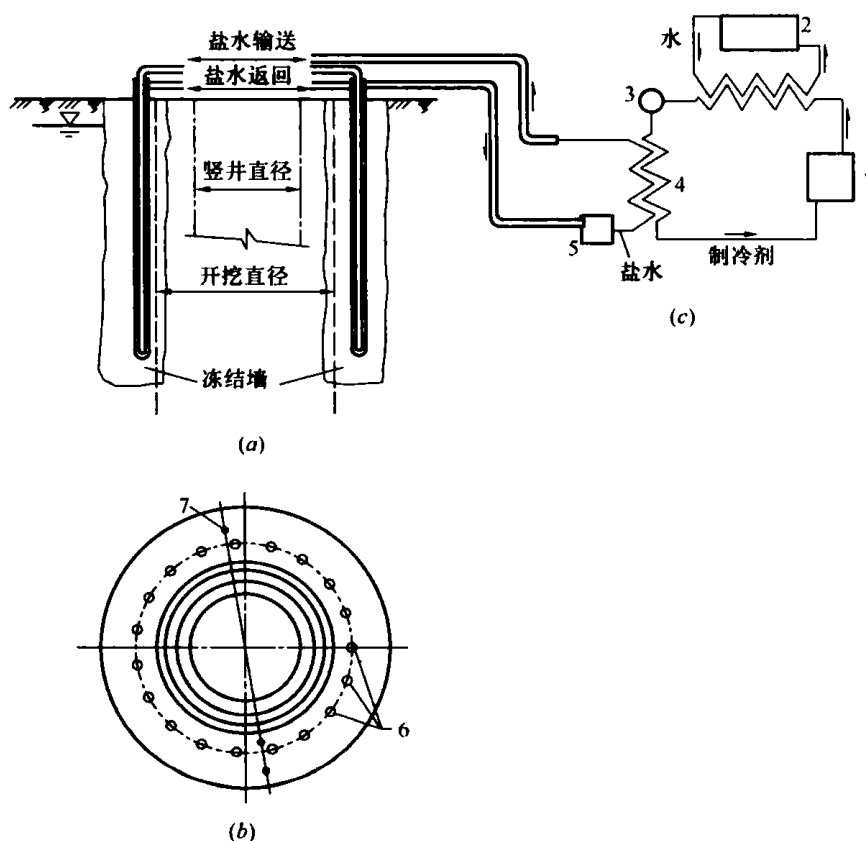


图 1-1 典型冻土支撑系统

(a) 竖井开挖; (b) 冻结管布设; (c) 冷却工厂

1—压缩机; 2—制冷剂; 3—安全阀; 4—盐水冷却器和蒸发器; 5—盐水泵; 6—冻结管; 7—地温孔

式的冻结墙, 这方面内容将在第 6 章中进行介绍。图 1-2 中描述了几种不同地基土冻结应用, 深黑色的粗直线表示冻结管, 相邻的阴影区域表示冻结土。这些图形包括了深基坑开挖、建筑基础旁开挖支护、滑坡整治过程中的临时加固、井筒开挖、深沟开挖以及隧道开挖等工程。

大多数地基冻结项目中采用了循环冷却冻结系统, 如图 1-1 所示。系统的安装包括现场准备、冻结管的埋置、制冷厂建设。冷冻液循环包括一个盐水储存罐、一个压力泵和一套冷却液到冻结管和返回到制冷厂的各种隔热设施。一般情况下, 冻结管的间距为 1m 左右。灵活控制多个冷冻管冷却液的供给, 可根据需要允许单个冻结管排出较多热量。可以采用土的热学参数来计算冻结过程中排出的能量以及冻结土墙的形成时间, 并且选择制冷设备的制冷能力等。正常情况下, 安装一个明挖基坑的循环冻结系统, 从开始到开挖工作可以进行需要两个月或更多的时间。

1.1.2 设计时应考虑的问题

现场勘察的探井深度必须超出设计开挖深度一定距离。钻探工作用来提供有关地下土层的信息, 并且为土的分类以及冻结和未冻结强度试验提供未扰动试样。理想情况下, 冻结墙墙底埋深应该置于不透水地层来减少墙底下水的流动, 否则流水带入的热量可能使冻结墙体发生弱化。冻土的热学属性参数估算需要土的类型、密度、含水量等参数。热学计算将在第 3 章进行讨论。从钻孔中可以获得有关地基温度和地下水信息。如果地下水的流速太大 (大于 $1\sim 2\text{m/d}$), 水中的热流可能阻止冻结土柱联结的形成, 将会在完整的冻结墙上留下缺口。防止的措施包括减小冻结管的间距或者增加一排冻结管来增大热量的排出速率, 并/或在安装冻结管时用稀泥浆封堵来降低土的渗透性和水流速率等。

土的冻结、融化以及开挖取土等工程活动可能导致地面产生移动变形。岩土冻结过程包括土孔隙水转变为冰, 其体积增加约 9%。Sanger 和 Sayles (1979) 假定一半的体积变化发生在垂直方向来估算冻胀量。沿着冻结墙的垂直边也可能形成冰的透镜体, 导致侧向冻胀压力的增加。Shuster (1972) 解释了在冻土中垂直向冻胀发生之前, 这些压力是如何超过侧向被动土压力的。更多方面的内容将在第 6 章中给出。

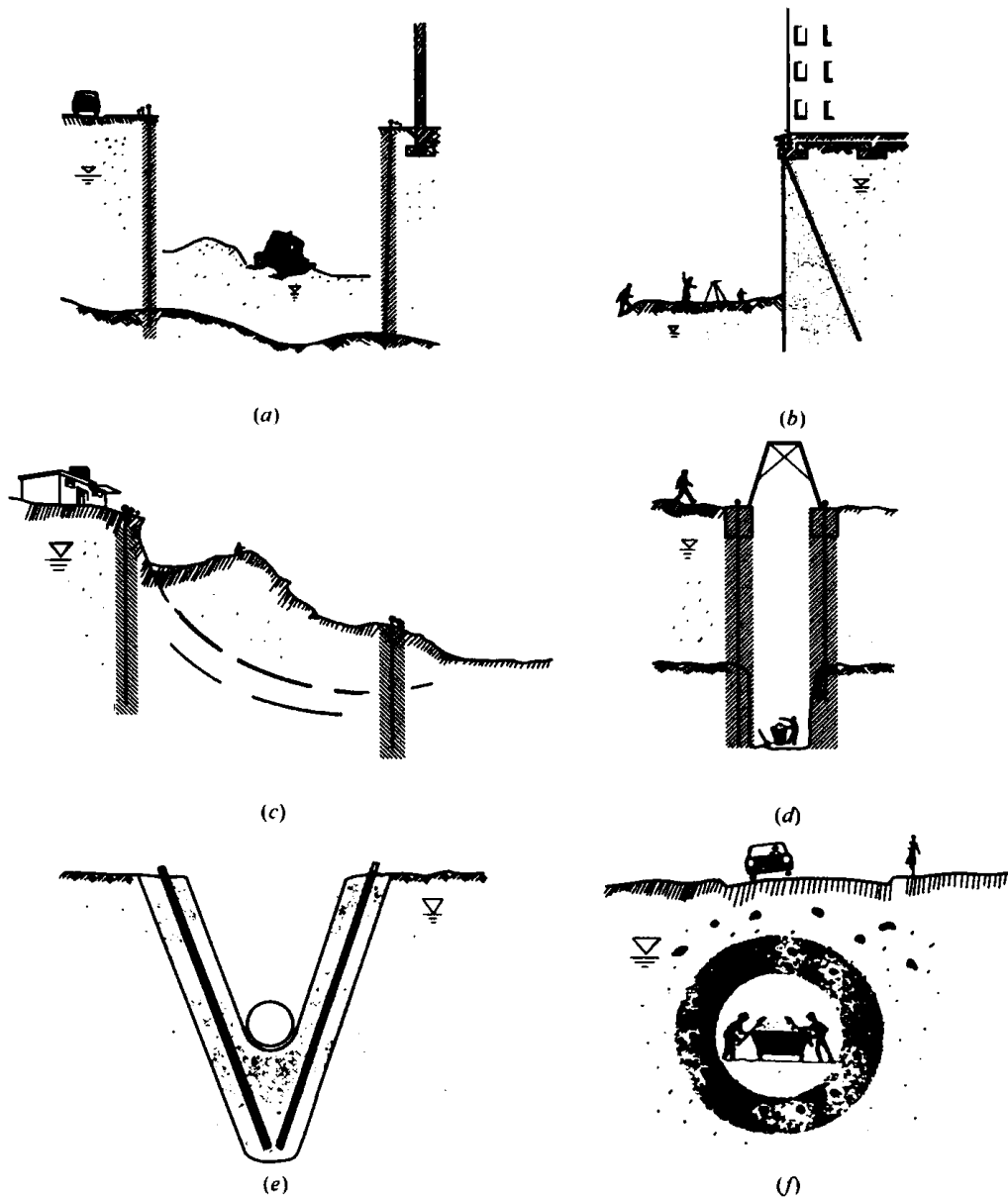


图 1-2 地基冻结应用

(a) 深开挖；(b) 基础加固；(c) 滑坡治理；(d) 竖井开挖；(e) 深挖沟槽；(f) 隧道开挖

来源：Shuster 1984。

融化沉降涉及冰透镜体的融化，以及当融化土的体积调整到一个新的平衡孔隙比后的项目完成总沉降。这些概念将在第 4 章中描述。开挖过程的取土活动会涉及在冻结墙一侧卸载。当建立新的力平衡时，冻结墙将产生一定的水平移动。有关冻结土支撑系统的介绍和相关设计问题将在相应的章节中展开讨论。

1.2 季节冻土和多年冻土

在南北半球的寒区，一定的土壤温度是形成季节冻土和永久冻土的必要条件。工程设计中必须了解这些寒区中地表以下地基的温度、活动层、多年冻土等概念。

1.2.1 寒区

世界寒区可能按照空气温度、积雪厚度、湖上覆冰或者冻结土的深度等来定义。温度和冻融深度对于冻土工程问题是最重要的。一年内最冷月份时的 0°C 等温线被用来定义北半球的寒区南界 (Bates 和 Bilello 1966)。在 10 年时间内曾经的季节冻融深度为 300mm 被认为是普遍接受的定义寒区冻土南界准则，如图 1-3。这个边界定义相似于用 0°C 等温线来划分的冻土南界，除较少情况外，近似于北纬 40° 。

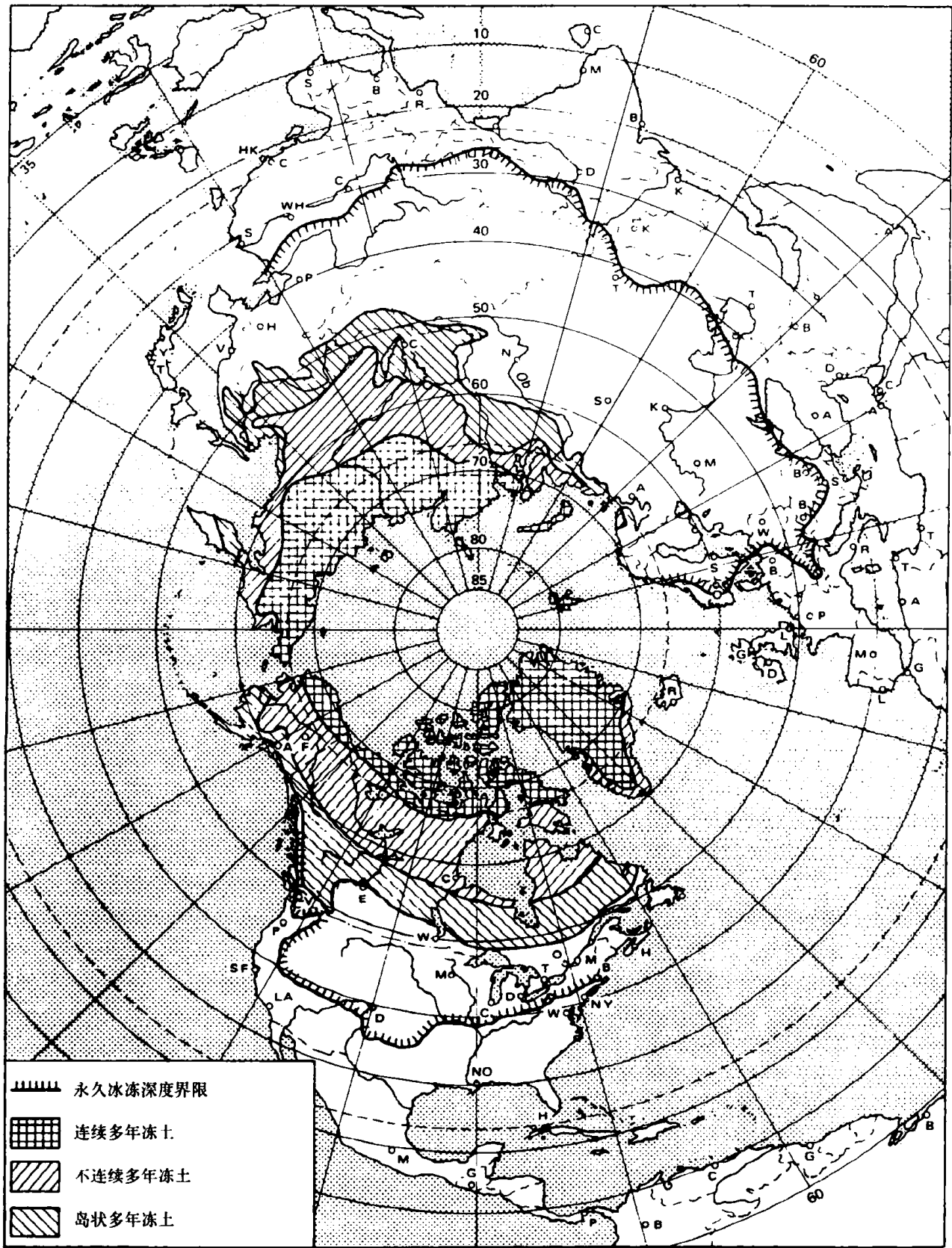


图 1-3 北半球的寒冷区域

来源：经 Burdick, Rice 和 Phukan 1978 允许。版权 1978 归 McGraw-Hill。

主要的海流如墨西哥暖流可能改善临近的大陆型气候。这是欧洲西北部海岸、英国、爱尔兰等相对潮湿温和气候的原因。由于对于冻土的分布和深度实际观测资料极少（原因是土的冻结温度依据矿物成分、有机物以及含水量的组成不同，通常在几度范围变化），所以采用 300mm 的冻结深度需要依据从气象数据得到的冻结指数来进行估算。300mm 的冻融深度近似于冻结指数为 $55^{\circ}\text{C} \cdot \text{d}$ ($100^{\circ}\text{F} \cdot \text{d}$) 的情况。寒