

冻土物理学

吉林科学技术出版社

冻土物理学

木下诚一编著

王 异

译

张志权

吉林科学技术出版社

冻土物理学

第一版

王 异

封

封

封

冻 土 物 理 学

(日)木下诚一著

王 异 张志权 译

吉林科学技术出版社出版 吉林省新华书店发行

哈尔滨市科委情报处铅印室印刷

787×1092毫米 32开本 9.5印张 195,000字

1985年7月第1版 1985年7月第1次印刷

印数: 1—2000册

书号: 13376·19 定价: 2.25元

著者为中译本写的序：

得悉我们写的《冻土物理学》被译成中文，感到十分欣慰。

《冻土物理学》是处于日本冻土研究最前线的学者执笔的，它从各个方面阐述了有关土的冻结的物理学方面的问题。在日本，本书不仅用于冻土研究，也在冻土技术开发方面，获得广泛的应用。著者期望这本《冻土物理学》，也会有助于中国的冻土研究及技术开发，并使它成为中日两国亲密的研究交流的开端。

北海道大学低温科学研究所所长 木下诚一

一九八四年十月四日

译者前言

木下诚一教授是国际著名的冻土学者，他所编著的《冻土物理学》，综述了包括他自己的学术论文在内约三百多篇文献，从各个方面阐述了冻土的物理学问题，是一本权威性著作，它不仅可供我国冻土研究工作者学习借鉴，而且对冻土技术开发，寒区建设，冻结法施工等，均有极大的参考价值，我们特地译出，以飨国内读者。

木下诚一教授对本书的翻译工作，给予很大的支持，不仅寄来原图底片，而且为中译本写了序。正如他在序中所说的那样，本书的出版，将成为中日两国学者研究交流的开端，这实在是一件值得庆幸的事。本书出版之际，正值木下诚一教授访华前夕，谨以本书略表我们欢迎之忱，并对木下诚一教授对本书出版的关心，表示谢意。

本书的翻译过程，得到低温建筑研究所李雄创所长的大力支持，研究所名誉所长总工程师袁忠淮在百忙中审阅了全部译稿，郭明珠同志协助校订了全文，在此一并致谢。

译者的专业知识及外语水平都很低，因此，错误之处，在所难免，敬请读者不吝指正。

译者

加，分别召开了永久冻土国际学术会议，1978年在德国，1980年在挪威，1982年在美国召开了用人工冷冻方法冻结土的专题讨论会。日本每年都要出版简报，在日本关于冻土的研究活动正在广泛地开展，但是用日文出版的有关论述冻土的专著书籍很少，因此，首先接受冻土的基础知识，编辑了本书，执笔的各位先生都是在本领域范围内日本的知名人士。只是，冻土物理。此为试读，需要完整PDF请访问：www.ertongb

前言

一般认为，所谓土的冻结，是只有在象阿拉斯加，西伯利亚那样极其寒冷的永久冻土地带，或对日本来说也只有在北海道及东北的一部分才有的现象。但是近年来，即使在象东京、大阪周围那样在天然气温条件下无论如何也不能感到土冻结的地区，也由于采用人工冷冻的方法，对软弱地基进行挖掘施工，在地下贮藏液化天然气（ -160°C ）液化石油气（ -42°C ）等低温液化气体，使周围地基冻结等等，也就产生了冻土。

土一冻结，地基将产生凸起，也就是所谓土发生了冻胀，而且土本身的物理性质也发生很大的变化。所以必须采取各种相应的防止措施。因此，近年来人们越来越迫切需要与土冻结相关的极为广泛的知识。

全世界冻土区域极为辽阔，在美国、加拿大、苏联等国有很多与开发那些区域相关的研究机关，而且也经常召开这方面的国际会议。（1963年在美国，1973年在西伯利亚，1978年在加拿大，1983年在阿拉斯加，分别召开了永久冻土国际学术会议。1978年在德国，1980年在挪威，1982年在美国召开了用人工冷冻方法，冻结土的专题讨论会。）日本每次都交出数篇报告。在日本关于冻土的研究活动正在广泛地开展着，但是用日文出版的有关论述冻土的合适书籍很少，因此，首先就有关冻土的基础知识，编写了本书，执笔的各位先生都是各领域范围内日本的知名人士。只是，冻土物理

学，特别是冻胀机理，好多地方都处在开发和研究阶段，即使在国际学会上，也是其说不一。本书各执笔先生是从自己视野范围内进行说明的，难免有不当和重复之处。冻土物理学今后也是一门发展中的新兴科学。望读者给予谅解。若本书对日本冻土研究的发展能有所帮助，真是莫大的荣幸。

木下诚一 1982年1月

目 录

第一章 土冻结概论	(1)
1.1 冻 胀	(1)
(1) 什么叫冻胀	(1)
(2) 冻胀过程实例	(3)
(3) 决定冻胀的因素	(5)
(4) 冻胀机理要点	(8)
(5) 冻胀机理	(8)
1.2 冻土的物理性质	(13)
(1) 构成冻土的元素	(13)
(2) 力学性质	(13)
(3) 热性质	(14)
(4) 电性质	(15)
(5) 冻融促进风化	(15)
1.3 永久冻土	(15)
(1) 定义	(15)
(2) 永久冻土的分布	(16)
(3) 永久冻土地带的气候	(19)
(4) 永久冻土地带的植被	(22)
(5) 永久冻土的起因	(24)
(6) 永久冻土现在是在发展中还是在退化中	(25)
(7) 永久冻土地带的奇异地形	(26)
第二章 土的冻结过程及冻胀现象	(37)
2.1 土的冻结深度	(37)

2.2	Berggren、Aldrich的修正解	(39)
2.3	野外冻胀现象的实例	(45)
2.4	Taber、Beskow 的冻胀机理研究	(51)
2.5	毛细理论	(53)
2.6	冻结过程中热和水流的关系	(56)
2.7	冻土中的水流	(60)
2.8	热和水结合的系统模型 (Harlan模型)	(63)
2.9	热和水结合的系统模型 (Taylor模型)	(68)
2.10	热和水结合的系统模型的问题	(69)
第三章	冻土的各种性质	(77)
3.1	力学性质	(77)
(3.1)(1)	力学实验	(77)
(3.1)(2)	强度特性	(83)
(3.1)(3)	变型特性	(91)
3.2	热性质	(93)
(3.2)(1)	冻土中的热状态	(94)
(3.2)(2)	热传导	(94)
(3.2)(3)	比热	(100)
(3.2)(4)	冻土的热膨胀率	(104)
3.3	不冻水	(105)
(3.3)(1)	冻土中的不冻水	(105)
(3.3)(2)	不冻水量的推断	(111)
第四章	冻胀力及冻胀机理	(119)
4.1	冻胀力	(119)
(4.1)(1)	伴随土冻结的吸排水现象和冻胀及	(119)
(4.1)	冻胀力的定义	(119)

(181)	(2) 毛细管冻胀理论及吸着水薄膜冻胀	(122)
(181)	力理论	(122)
(181)	(3) 关于冻胀力的实验	(124)
(14.2)	冻胀机理	(130)
(181)	(1) 衡量冻胀现象的强度和量度的尺度	(130)
(181)	(2) 表示冻土内析出冰晶的吸排水(泵)能力	(139)
(181)	力的推断	(139)
(181)	(3) 冻结膨胀率(冻胀率)、冻结吸排水率	(147)
(181)	的有效约束应力, 冻结速度的关系	(147)
(181)	4.3 冻胀机理的模型化和基础微分方程式	(153)
(181)	(1) 控制冻结面附近冻土内热及不冻间	(153)
(181)	隙水同时输送的基础微分方程式	(153)
(181)	(2) 控制冻土内不冻间隙水压及温度分布的	(156)
(181)	基础微分方程式的简化及电子计算机解析	(156)
(181)	(3) 解明冻胀机理的展望	(160)
	第五章 人工冻土的利用	(172)
	5.1 冻结施工法的历史	(172)
	5.2 冻结施工法的特征	(173)
	5.3 冻结理论	(175)
	(1) 冻结速度	(175)
	(2) 温度分布、冻结负荷	(176)
	(3) 冻结效率	(177)
	5.4 解冻理论	(178)
	(1) 冻结中由于停止冷却的解冻	(178)
	(2) 工程完了后的解冻	(179)
	(3) 冷冻液泄漏时的侵蚀引起的解冻	(180)

5.5 地下水流的影响	(181)
(1) 冻土壁形成时的影响	(181)
(2) 冻土壁完成后的影响	(183)
5.6 冻结膨胀对未冻结区域的影响	(184)
(1) 水平方向上的土压和变位	(184)
(2) 竖向上的移位	(185)
5.7 今后的展望	(187)
(1) 开发课题	(187)
(2) 扩大应用范围	(189)
第六章 冻结和冻胀的数学解析	(198)
6.1 冻结深度推算模型	(198)
(1) 冻结深度推算的必要性	(198)
(2) 解析的原理和手段	(198)
(3) 解析模型的适用事例	(205)
6.2 通过FEM进行的冻结法土压力分析	(211)
(1) 关于冻结土压力	(211)
(2) 冻结土压力解析	(212)
(3) 利用二维空间圆筒模型解析冻结土压力	(213)
(4) 由FEM进行的冻结土压力解析	(214)
6.3 热和水共同移动的模型	(217)
(1) 共同移动模型的基本式	(217)
(2) 土质的各常数	(220)
(3) 解析方法	(221)
(4) 数值计算举例	(223)
第七章 室内冻胀试验法	(234)

7.1 概论	(234)
(1) 冻胀试验的历史	(234)
(2) 影响冻胀因素的分类	(235)
(3) 冻胀试验的种类	(236)
7.2 冻胀试验装置	(237)
(1) 试验装置举例	(237)
(2) 试体容纳器	(240)
(3) 多孔板	(240)
(4) 冻结开始时的冰核形成	(241)
7.3 测定方法	(242)
(1) 冻胀量和水分移动量	(242)
(2) 关于力学的各种量	(243)
(3) 关于热的各种量	(244)
7.4 试验土和试样	(245)
(1) 代表试料土的试样	(245)
(2) 试样的宽度	(246)
(3) 试样的长度	(247)
(4) 试样冻结过程	(248)
(5) 试样的应力变化过程	(250)
7.5 两端面温度一定的冻胀试验	(250)
(1) 冻结方法	(250)
(2) 冻胀性判定试验	(251)
(3) 长期冻胀实验	(253)
7.6 冻结速度一定的冻胀实验	(254)
(1) 冻结速度一定所需要的冷却条件	(254)
(2) 试验条件和整理结果	(256)

(7.7) 试验结果的适用和问题	(259)
------------------	-------

(1) 试验结果的适用	(259)
-------------	-------

(2) 涉及到冻胀的动水阻抗的影响	(259)
-------------------	-------

(3) 冻结面前方的脱水压密	(262)
----------------	-------

第八章 有关问题	(270)
-----------------	-------

8.1 观测仪器	(270)
----------	-------

(1) 测定用器械的种类和特点	(270)
-----------------	-------

(2) 冻结、融解过程的记录	(275)
----------------	-------

8.2 火星的永久冻土	(277)
-------------	-------

第一章 土冻结概论

土到 0°C 以下，土中的水分就冻结，所谓的土冻结也就是这一状态。它与冻结前有明显的变化，体积膨胀，也就是发生冻胀，各物理性质发生变化，特别是变的坚硬这一特性更为明显。土的冻结过程，给自然地形带来了很大的影响。特别是在永久冻土地带尤其显著。

在本书第二章以后，就种种现象，从物理学这一角度，进行了详细说明。本章仅就与土冻结有关的三大项目，即：冻胀，冻土的各种物理性能，永久冻土，进行总的论述。其目的是为了使读者从概念上掌握土冻结这一现象。

1.1 冻 胀

(1) 什么叫冻胀

在冬天土一冻结，地面往往凸起，这就是冻胀。若条件具备的话，地面将向上凸起几十厘米，体积与冻前相比，有时增加一倍以上。象这样的例子，在人工冻土的场合也能观察到。在土冻结时，若土中所含的水分是在原有位置冻结的话，体积增量仅是其水分体积的 $1/10$ 。因此从土的整体来看，体积增加，仅在百分之几。如图 1.1 所示，当我们看到体积增量显著的冻土断面时，就会发现有好几层透明状的冰镜。其厚度从几毫米到几厘米。沿着一条铅垂线将这些冰镜的厚度加起来，大致和整个体积的增量，即冻胀量相等，这

針對該本土 章一第



圖 1.1 冷库地面下的冻土

图 1.1 冷库地面下的冻土断面，向上冻胀了 32cm，从上向下 55cm 以下是土，从上向下 190cm 处为冻结层，主部分的厚度为 135cm，所以向上冻胀率为 31%，在断面上可以看到很多冰镜。

些冰镜在冻结前并非就是土壤中的水层,而是在冻结的时候,水从没有冻结部分向冻土部分迁移后形成的,这就是冻胀的基本原理。

(2) 冻胀过程实例。

在北海道土的冻结,大体上在11月下旬开始,一直到来年3月上旬达到最高峰。到了春天,从地面开始解冻。从冻结开始到完全解冻是怎样的冻胀过程,请详见第二章。这里仅介绍一例。在北大低温研究所的苫小牧实验林内的冻胀观测现场,设一面积为 5×5 m深为2 m的池,池内侧有防水层,其中装有粉质土。在冻结前,把该池子的地下水位定在地面下40cm处,1976年11月27日开始冻结,其后地下水位下降,吸上来的水分促使地面凸起产生冻胀。在1月5日地下水位降至池底,此后池内处于没有自由地下水的状态。这一段的冻胀速度大致是每天0.5cm,而后一段的冻胀速度缓慢,每天只有0.1~0.3cm。到3月上旬冻胀量达26cm。冻结一直持续到3月中旬,从最初的地面向下达51cm处。最大冻结深度为77cm,冻胀率为51%。从3月中旬开始到5月中旬完全解冻,地面也返回到冻结前的位置。土冻结的天数超过170天,这年冬天的冻结指数(日平均气温 0°C 以下值的累计值)总计达750 $^{\circ}\text{C}$ 天,苫小牧不是积雪很多的地方,但是每当降雪时,也必须除去池上面的积雪。

上面是一个冻胀严重的实例,如地面凸起近10cm,地上设施即将遭到破坏。图1.2是由于人行道路面冻胀而产生龟裂的实例。

图1.3所示是为了纠正铁路钢轨因冻胀不均匀,在钢轨和枕木之间,嵌有夹板的实例。

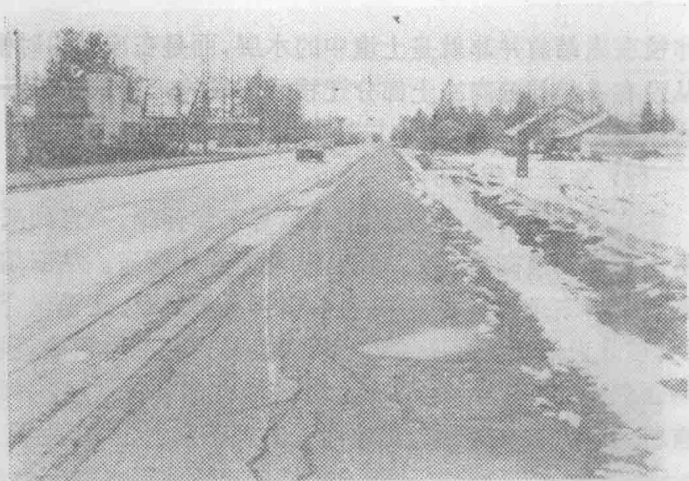


图 1.2 入行道柏油路面产生的龟裂，在机动车道上由于对冻胀采取了措施所以未产生龟裂。

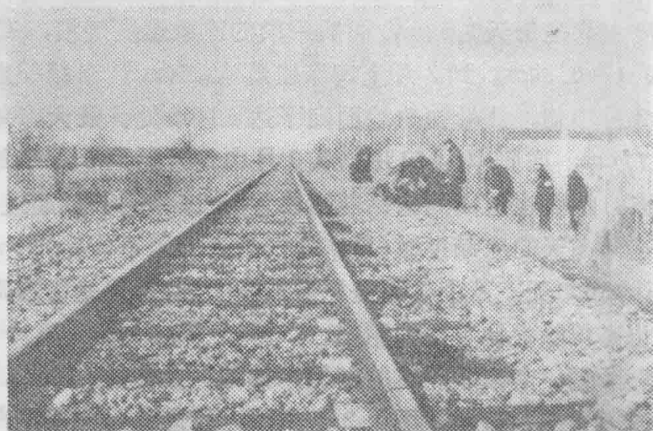


图 1.3 为了纠正铁路轨面冻胀不均匀，在钢轨和枕木之间嵌入木夹板。在没有夹板的冻胀最大地方，挖掘旁边的土，以便观察冻土的断面。