

季节冻土区 水工建筑物抗冻技术

曲祥民 张滨 编著



中国水利水电出版社
www.waterpub.com.cn

季节冻土区 水工建筑物抗冻技术

曲祥民 张滨 编著



中国水利水电出版社
www.waterpub.com.cn

内 容 提 要

本书基于黑龙江省水利科学研究院等单位从 20 世纪 80 年代以来在水工建筑物抗冻技术研究方面的科研成果,对季节冻土地区水工建筑物抗冻技术研究的实际经验和理论进行了较为完整和系统的总结。内容包括:冻土的物理力学性质,土的冻胀性影响因素,桩(柱)基础、平板基础、挡土墙、衬砌渠道及土坝(堤)护坡的冻害防治技术等。书中所包含的科研成果、数据图表、工程实例及技术方法具有很高的参考价值。

本书可供从事季节冻土区水工建筑工程设计、施工、工程管理人员以及大专院校相关专业的师生参考。

图书在版编目(CIP)数据

季节冻土区水工建筑物抗冻技术/曲祥民,张滨编著.
北京:中国水利水电出版社,2008
ISBN 978-7-5084-5078-0

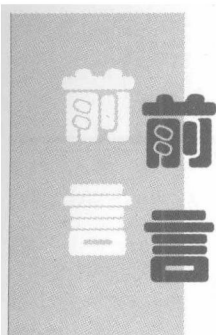
I. 季… II. ①曲…②张… III. 冻土区—水工建筑物—
抗冻性—技术 IV. TV6

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2008)第 117519 号

书 名	季节冻土区水工建筑物抗冻技术
作 者	曲祥民 张滨 编著
出版发行	中国水利水电出版社(北京市三里河路 6 号 100044) 网址: www. waterpub. com. cn E-mail: sales@ waterpub com. cn 电话: (010) 63202266 (总机)、68367658 (营销中心)
经 售	北京科水图书销售中心(零售) 电话: (010) 88383994、63202643 全国各地新华书店和相关出版物销售网点
排 版	中国水利水电出版社微机排版中心
印 刷	北京市兴怀印刷厂
规 格	184mm×260mm 16 开本 8.75 印张 207 千字
版 次	2008 年 8 月第 1 版 2008 年 8 月第 1 次印刷
印 数	0001—2000 册
定 价	32.00 元

凡购买我社图书,如有缺页、倒页、脱页的,本社营销中心负责调换

版权所有·侵权必究



我国国土面积约为 960 万 km^2 ，其中多年冻土区约占 21.5%，季节冻土区约占 53.5%。在广袤的冻土区进行工程建设，不可避免地要遇到冻土所带来的一些问题。了解、探讨土的冻胀、冻土与建筑物之间的相互作用，进而研究防治建筑物冻害的有效措施，是工程冻土学研究的主要任务之一。

本书的内容绝大部分来源于黑龙江省水利科学研究院 30 多年来从事水工建筑物抗冻技术研究的科研成果，结合其他相关工程与研究的经验，对季节冻土区水工建筑物冻害防治的实际经验和理论进行了较完整的总结。书中包含较多的科学研究与试验数据、相关的图表以及工程实例，可供相关工程参考。

我国有关水工建筑物抗冻技术方面的书籍较少，为使广大的工程技术人员较好地了解目前我国水工建筑物抗冻技术研究与应用的全貌，掌握实用的水工建筑物抗冻技术，编者编写了这部著作。应该说明，水工建筑物抗冻技术作为一门应用学科，是理论知识与应用密切相连的，所以在编写过程中，尽可能地注意到理论联系实际，在使用技术上下工夫。由于冻土的特殊性质和它与建筑物之间作用的复杂性，不少作用机理还有待进一步的研究和探讨，设计方法、计算方法还有待创新、完善和改进。

本书由曲祥民、张滨编著，刘桂英、那文杰、许正海参与了相关的编写工作。全书由张滨、许正海统稿，最后由曲祥民修改定稿。

在编写过程中，袁安丽、孙景路在收集资料、校对、图表绘制等方面做了不少工作，在此，一并表示真挚的谢意。

本书是在编著者们多年从事水工建筑物抗冻技术研究与实践的基础上，收集大量资料编写而成的。在编写过程中参阅了有关文献和著作，并引用了一些图表，在此特向原作者表示感谢。

由于作者水平有限，编写的时间也比较匆忙，书中难免存在谬误之处，恳请各位读者批评指正。

目 录

前言

第1章 绪论	1
1.1 冻土的一般概念	1
1.2 我国的冻土分布	2
1.3 季节冻土与土工建筑物的关系	4
第2章 冻土的组成及物理特性	6
2.1 冻土的基本成分和组构	6
2.2 土冻结过程中的温度特征	7
2.3 土中水的基本分类	9
2.4 冻土中水的相成分	10
2.5 冻土的物理特性	11
第3章 土体冻胀及其影响因素	22
3.1 有关指标与概念	22
3.2 水分迁移的机制	25
3.3 影响土体冻胀的因素	28
第4章 桩（柱）、墩基础建筑物的冻害防治技术	37
4.1 概述	37
4.2 桩（柱）抗冻胀计算	38
4.3 桩（柱）、墩基础抗冻胀结构及工程措施	42
第5章 平板式基础冻害防治技术	49
5.1 平板式基础冻胀破坏类型	49
5.2 基底法向冻胀力的构成及其影响因素	51
5.3 基底法向冻胀力的设计取值	53
5.4 平板式基础防冻胀措施设计	55
第6章 挡土墙的冻害防治技术	74
6.1 概述	74
6.2 挡土墙水平冻胀力	77
6.3 水平冻胀力设计取值	81

6.4 挡土墙的抗冻胀计算..... 83

6.5 挡土墙抗冻胀结构及工程措施..... 89

第7章 衬砌渠道的冻害防治技术..... 101

7.1 概述 101

7.2 衬砌渠道抗冻胀计算 102

7.3 衬砌渠道抗冻胀结构及工程措施 106

第8章 土坝、堤防等建筑物的冻害防治技术..... 114

8.1 土坝、堤防的冻害破坏规律 114

8.2 土坝、堤防等建筑物的冻害防治措施 117

8.3 土坝、堤防等建筑物的抗冻胀计算 123

参考文献 133

第 1 章 绪 论

我国幅员辽阔，国土面积约为 960 万 km^2 ，从长江北岸开始的广大地区分布着季节冻土，而大兴安岭、小兴安岭、青藏高原和西部高山的上部及冰川边缘地区还分布着多年冻土。

随着我国经济的蓬勃发展，冻土地区的各项工程建设也在大规模地进行。冻土作为建筑物的地基有着不同于融土的许多特性，如果不能正确地认识它，掌握它的性能，仍按常规融土地基的设计理论与方法进行各项工程设计与施工，势必给已建和在建工程造成破坏，影响正常使用。这类例子在工业、民用建筑、公路、铁路、桥梁和水利工程中举不胜举。1942 年美国在阿拉斯加半岛上修建的费尔班克斯—都逊科里克公路，全长 2800km，因勘测设计和施工时忽略了多年冻土的特点，竣工后，经过一年的冬季，就发现有 800km 线路遭到滑坡、冰推、变形的危害。前苏联在 20 世纪中叶修建的铁路，有 1/3 的路段遭到冻胀破坏。在前苏联的赤塔市有一个面包工厂的烤炉，因冻土地基融化下沉，使得它完全沉入地下。我国北方地区各类水工建筑物遭到冻胀破坏的情况也是屡见不鲜。20 世纪 70 年代，我们对黑龙江省查哈阳灌区支渠以上的建筑物 112 座（包括进水闸 42 座、排水闸 8 座、节制闸 13 座、跌水 23 座、渡槽 1 座、其他结构构造物 25 座）进行了全面考察，发现遭受不同程度冻胀破坏的就有 93 座，占全部构造物的 83%。新中国成立以来，有的灌区工程已经重建了几次，造成的经济损失以亿元计，而且还严重地影响了水利工程效益的发挥。群众叹为“修不完的工程、配不完的套”。季节冻土地区水工建筑物的抗冻技术措施研究，是水利工程建设亟待解决的重大课题。

我们研究季节冻土的目的在于了解它的成分、结构、性质和状态；了解它的形成条件、地理分布以及它与自然因素的关系；了解它的冻胀现象、规律以及工程因素对其的影响，从而更好地认识、掌握在冻土区进行各项工程建设的理论与方法。

1.1 冻土的一般概念

地球表面根据高程、接受太阳辐射能的多少以及地球表面太阳辐射所能达到的深度范围的温度变化情况的不同，自地球赤道向两极，地球表面大致分为三个带。

(1) 常年处于正温、没有冻结状态。

(2) 表层一定深度（少则几厘米，多则几米）在冬季冻结，夏季融化。冻结的时间为几个小时、几天或几个月。而其下部土层常年处于正温状态。

(3) 表层一定深度的土层，夏季融化，而在冬季冻结，其下部土层常年处于负温状态。

根据土冻结持续的时间，又可将冻结状态的土分为以下几种。

- (1) 暂时冻土——冻土存在的时间为几个小时或只有几天。
- (2) 季节冻土——冬季冻结，夏季融化的土。
- (3) 隔年冻土——冬季冻结，一二年内不融化的土。
- (4) 多年冻土——冻结时间延续3年以上，有的长达一个世纪或几千年的土层。

暂时冻土和季节冻土均直接从地面开始冻结，而多年冻土一般则从地表下若干深度开始。根据季节冻、融层下面的土层是冻土还是融土的不同衔接情况，又可分为下列几种情况。

- (1) 季节冻、融层和多年冻结层衔接在一起，这种情况称为衔接多年冻土。
- (2) 季节冻、融层和多年冻结层中间有一层融化层，这种情况称为不衔接多年冻土。
- (3) 季节冻、融层和下面的融土层衔接，一般季节冻土区皆属这种情况。

季节冻、融层与下垫层衔接情况如图 1.1 所示。

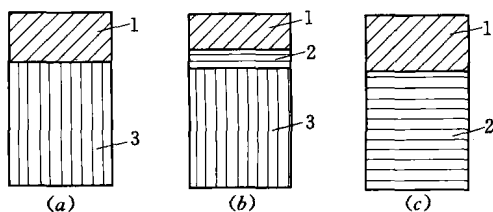


图 1.1 季节冻、融层与下垫层衔接情况示意图

(a) 衔接多年冻土；(b) 不衔接多年

冻土；(c) 季节冻土

1—季节冻、融层；2—融土；3—多年冻土

冻土不论是作为建筑材料或地基，对工程实践来讲，最有意义的是土中水的冻结。冻土的定义为：凡是温度等于或低于 0°C ，并且含有冰胶结层的土称为冻土。如果只有负温而没有冰胶结层的土层为寒土。土的冻胀和融沉对建筑物的危害，均是由于土中水相变所致。

土冻结时，不仅其温度处于 0°C 以下，更重要的特征是其中有冰的存在，它使得原来松散状态的介质，表现出固体的性质，其

物理—力学性质有很大改变，诸如抗压强度增大、压缩性减小等，冻土比融土坚硬得多。而融化时，由于抗剪强度的下降，又常造成工程的破坏或失事。为此，我们必须深刻地认识冻土，才能征服和利用它。

冻土的强度和力学性质与温度及含水量有很大关系。根据冻土的坚硬强度又可分为以下几类。

- (1) 坚硬冻土——负温度较低且被冰所牢固胶结的土。在建筑物荷载作用下，表现有一定的脆性破坏和压缩性很小的特点。
- (2) 塑性冻土——负温度较高，土的颗粒虽被冰所胶结，但具有黏滞性，因为还有较多的未冻水存在。其特点是在建筑物荷载作用下压缩变形较大。
- (3) 松散冻土——土中含水量较少，没有被冰胶结的砂和碎石土均属此类。一般来讲，这种土冻融前后的力学性质改变不大。

1.2 我国的冻土分布

我国幅员辽阔，国土面积约 960 万 km^2 ，多年冻土的面积约有 207 万 km^2 ，约占国土面积的 21.5% 。它们主要分布在大兴安岭、小兴安岭的北部，青藏高原以及西南、西北部的高山之颠和冰川外缘。其分布在平面上服从纬度分带规律，在垂直方向上服从高度分带规律，见图 1.2。

1.2 我国的冻土分布

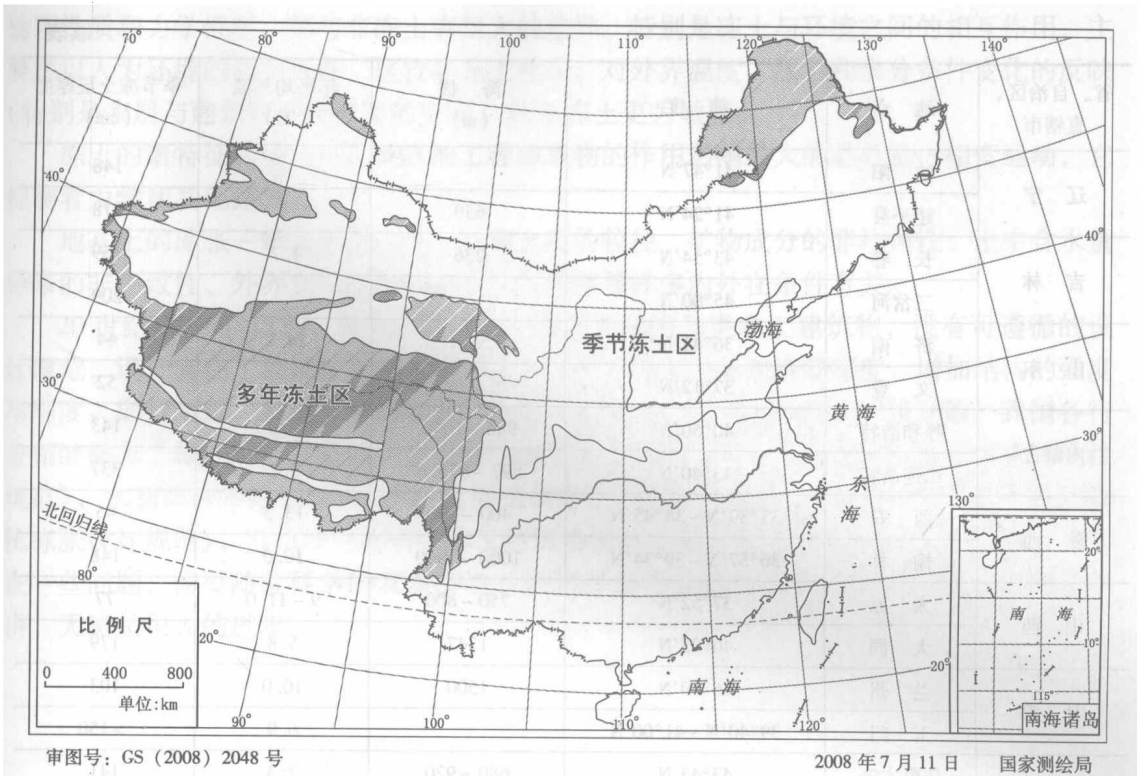


图 1.2 中国冻土分布图

在地球的中纬度地带，除了在现代冰川或多年积雪的高山顶部分存在零星的多年冻土外，一般没有大面积分布的多年冻土。在我国不仅有高纬度低海拔的平原型冻土，而且有低纬度高海拔的高原（山）型冻土。它们不仅对研究冻土存在条件和区域分布特征是不可缺少的，而且高原冻土和欧亚大陆冻土的南缘在冻土生成条件、发生动态、冻土现象及冻土与环境（包括人为环境）之间相互作用方面都有其特点，这更是研究整个冻土学所必需的。

我国的季节冻土区，从长江北岸开始，遍布整个北方的十几个省（自治区、直辖市）。在黄河下游的南侧、长江以北地区，季节冻土层的厚度一般不超过 50cm；在我国北部，冻土层的厚度均大于 50cm。这明确显示出季节冻土的纬度分带性。在季节冻土区的黑龙江省，季节冻土层厚度一般在 2m 左右，在多年冻土区的洛古河一带，季节冻土层的厚度可达 4m 以上。我国的一些地方季节冻结土厚度见表 1.1。

表 1.1 我国部分城市季节冻土层厚度

省、自治区、直辖市	地点	纬度	海拔 (m)	年平均气温 (°C)	季节冻土层厚度 (cm)
北京	北京	39°57'N	52.3	11.6	89
天津	天津	39°09'N	2.9	12.2	69
黑龙江	哈尔滨	45°45'N	146.0	3.7	198
	伊春市	47°40'N	400.0	1.0	290

续表

省、自治区、直辖市	地 点	纬 度	海 拔 (m)	年平均气温 (℃)	季节冻土层厚度 (cm)
辽 宁	沈 阳	41°47'N			148
	建平县	41°24'N	659		178
吉 林	长 春	43°54'N	236	4.7	169
	三岔河	45°00'N			209
山 东	济 南	36°41'N	55.1	14.1	44
	文 登	37°12'N			52
内 蒙 古	呼和浩特	40°50'N	986 ~ 1040	2 ~ 6.7	143
	二连浩特	43°40'N	897 ~ 975.6	3.2	337
陕 西	西 安	33°39'N ~ 34°45'N	400 ~ 700	13.3	45
	榆 林	36°57'N ~ 39°34'N	1000 ~ 1500	10.0	148
山 西	太 原	37°52'N	750 ~ 800	9 ~ 11.0	77
	大 同	40°05'N	1347	5.8	179
甘 肃	兰 州	36°00'N	1500	10.0	103
	玉 门	39°40'N ~ 41°00'N		6.9	> 150
新 疆	乌鲁木齐	43°43'N	680 ~ 920	7.3	141
	巴里坤	43°21'N	1500 ~ 2100	1.0	> 253
西 藏	拉 萨	29°36'N	3650.0	7.5 ~ 8.0	26
	班戈县	31°37'N			296
宁 夏	银 川	38°08'N ~ 38°52'N	1100 ~ 1200	8.3 ~ 8.6	103
	同心县	36°59'N	1240 ~ 2625		137
青 海	西 宁	36°34'N	2275	5.5	134
	德令哈市	37°22'N	2982	3.7	204
河 北	石家庄	37°27'N ~ 38°47'N		13.0	54
	涞源县	39°22'N		7.6	150
四 川	成 都	30°39'N	500.0	16.4	50
	甘 孜	31°39'N	3410	5.6	95

1.3 季节冻土与土工建筑物的关系

我国东北、华北和西北的 10 余省（自治区、直辖市）均处在季节冻土地区。在这些地区修建的各类土工建筑物（包括闸、涵、桥、跌水、渡槽、渠道衬砌、堤坝护坡等），如果按常规融土的建筑理论和方法进行设计与施工，在实践中暴露出许多弱点，工程冻害现象和破坏的规模相当普遍与严重。理论和实践均已指出，按非冻土地区建筑理论来评价和指导冻土地区的工程建设是不可行的。因为冻土作为地基来讲，不论是其成分、组构、

物理性质和力学性质，都与非冻土有很大的差异。特别是冻土与环境之间的相互作用，主要是以人为环境的相互联系，这较非冻土复杂。对外界温度、压力和水分条件变化的反映（特别是表层与建筑物基础涉及的空间）较非冻土更为敏感。

冻土的诸特征对季节冻土地区的工程建筑物的作用影响最大的是热量—相变运动，它控制着力学和其他过程。

地基土的冻胀一般是不均匀的，这和土质的粒径、矿物成分的非均匀性、土中含水量分布的非一致性、外界负气温冷却强度的差异性等许多内外在条件有关。

20 世纪 80 年代以前，我国在季节冻土地区修建的各类水工建筑物，没有可遵循的设计规范，设计者在工程设计时只能靠经验或尽力加深加大基础砌置深度、增加结构的强度与刚度。即使如此，有些工程的冻胀破坏也未能幸免。自 20 世纪 90 年代开始，我国各行业相继颁布了相关的设计规范，如交通部颁布的 JTJ 024—85《公路桥涵地基与基础设计规范》，水利部颁布的 SL 18—2004《渠道防渗工程技术规范》，SL 23—2006《渠系工程抗冻胀设计规范》，SL 211—2006《水工建筑物抗冰冻设计规范》等。虽然这些规范还存在一些问题，需要随着科学的发展和技术的进步逐渐修改与完善，但对工程技术人员来讲，无疑是很大的进步。

第 2 章 冻土的组成及物理特性

2.1 冻土的基本成分和组构

2.1.1 冻土的基本成分

冻土是一种复杂的多相、多成分的复合体。在结构上呈毛细多孔状，整体上是非均匀和各向异性的。按冻土组成成分的状态，可以分为固体部分、液体部分和气体部分。

冻土的固体部分由土的骨架和负温矿物组成。冻土的骨架一般是矿物和极少数的有机沉积物；冻土的负温矿物包括水、冰盐合晶和负温下结晶水化物，其中冰的形成和特性以及它与冻土中骨架相对数量和空间排列，对冻土性质影响极大。

冻土的液体部分是未冻水。这种水往往是溶解有各种可溶物质的自然水，它在冻土中被吸附在土颗粒表面，作为吸附水存在着。

冻土的气体部分有水蒸气、空气、沼气以及其他气体。它们可处在自由状态和吸附式密封状态。自由气体的数量取决于土的孔隙度，吸附气体的数量与冻土骨架的数量、成分和孔隙有关，并与冻土中有机质含量正相关。

2.1.2 冻土的组构

2.1.2.1 冻土的结构

冻土的结构是由冻土结构和冻土构造决定的。冻土的结构是指微观上的矿物质点及其聚合物、冰晶的形状和大小以及冰胶结的形式。按水相变成冰时的结晶程度划分，冻土结构可以分成以下几类。

- (1) 他形不等粒结构（冻结速率快，冰晶发育不好）。
- (2) 全自形粒状结构（冻结速率慢，冰晶发育良好，晶轴定向排列）。
- (3) 半自形粒状结构（介于上述两种情况之间）。

按冰胶结形式大致可以划分为以下几类。

- (1) 接触式结构（冰分布于矿物颗粒骨架的胶结处）。
- (2) 片状结构（冰分布于矿物颗粒表面，留有较大的孔隙）。
- (3) 孔隙式结构（冰充填于全部孔隙）。
- (4) 基底式结构（矿物颗粒之间被冰所分隔，彼此不接触）。

2.1.2.2 冻土的构造

根据冻结强度、边界条件、土体从单向冻结还是从多向冻结、原驻水状况、有无地下水源补给条件等，决定着在冻结过程中冻土中冰晶体的形状、大小及与矿物颗粒间的相对排列方式，从而形成不同的冻土构造。在天然地层中经常遇到的情况，冻土的构造大致有如下几种类型，见图 2.1。

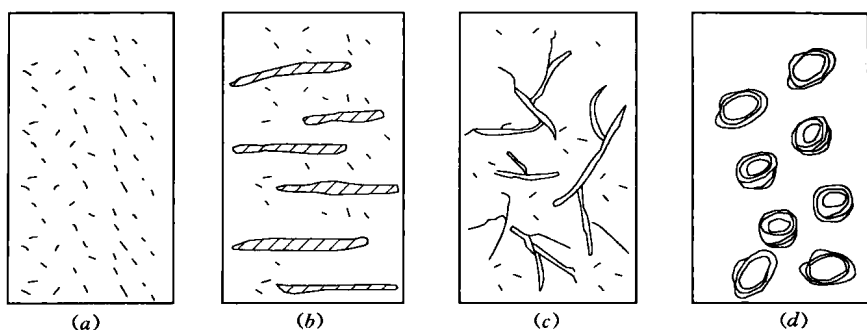


图 2.1 冻土构造示意图

(a) 整体状构造; (b) 层状构造; (c) 网状构造; (d) 冰包裹状构造

1. 整体状构造

当外界冻结强度很大, 土中温度梯度也很大, 冻结锋面向下推移的速度很快, 下卧融土层中的水分来不及迁移就在原地冻结成冰, 这时冰晶较均匀的分布在孔隙中, 肉眼难见到明显的冰晶体 (隐晶), 冻土的构造呈整体状。一般粗颗粒土容易形成整体状构造。由于整体状冻土水分重分布不明显, 所以冻胀性也不大。这种土在融化后与冻前比较, 其物理力学性质变化不大。

2. 层状构造

层状冻土构造只在黏性土及粉、细砂中并且含水量较大时, 在单向冻结的条件下才能产生。当外界冷却强度适中, 土中温度梯度较小, 冻结锋面向下推移的速度缓慢, 再加上土含水率高, 水相变时放出的潜热使冻结锋面在某一位置停留的时间较长, 下卧未冻土层的水分有充足的时间迁移到冻结前缘, 于是便形成冰层。层状冻土产生的冻胀明显, 融化后, 这种构造的冻土, 物理力学性质有很大改变, 往往会产生很大的融沉, 其承载力大大降低, 抗剪强度可降低 80% 以上。

3. 网状构造

网状构造的冻土也多产生在细颗粒土中, 它是在水源补给条件充分, 且在多向冻结条件下形成的, 有着各种形状的冰带和连续的网或格。有时由于土质不均匀, 土层中存在原生的纹理、裂缝, 冻结时除形成冰透镜体外, 还产生大量纵横交错的冰脉, 也可形成网状构造。网状构造冻土其冻胀性和融沉介于整体状构造和层状构造冻土之间。

4. 冰包裹状构造

冰包裹状冻土多产生在砾石土中, 当这种土饱水并处在长期冻结条件下, 在砾卵石周围形成冰包裹体, 使砾卵石颗粒彼此分开, 处于被包裹的“悬浮”状态, 这种构造的冻土多发生在多年冻土的上限附近。在一般情况下, 砾石地基具有较高的承载力和很小的压缩性, 但出现冰包裹状构造后, 一旦融化将会产生严重的下沉。

2.2 土冻结过程中的温度特征

纯净的水在 0°C 时冻结, 有人将蒸馏水置于清洁的容器中, 冷却到零下许多度仍不

于液态，这种液态水称为过冷水。在室内试验发现最低过冷水的温度为 -5°C ，可是将这种负温下的水稍微施加震动，立刻出现冰晶。水的这种超过相变温度而未发生相变的现象称为水的过冷现象。

水在结晶时必须要有结晶核存在方可结晶。冰晶、尘埃和其他杂质均可成为结晶核，而其中冰晶在冰结晶过程中的作用最为积极。

1924 年法兰盖特首先发现水在冻结时有过冷现象。

水的过冷现象和冷却强度有关见表 2.1，当水处于温度接近 0°C 的介质中，观测表明，水长期保持过冷状态而不结晶，当冷却强度较大时，则观测不到水的长期过冷。观测资料还表明，水在土体介质中过冷状态与水在容器中的过冷状态相比较，由于在土中存在较多的结晶核，水的过冷状态的稳定性较小。

表 2.1 水过冷与冷却强度的关系

冷却剂温度 ($^{\circ}\text{C}$)	水的过冷温度 ($^{\circ}\text{C}$)		水过冷状态持续时间	
	在砂孔内	在容器中	在砂孔内	在容器内
-2.9	-2.9	-2.9	>7 ~ 8h	
-3.9	-3.6	-3.9	2h 左右	>5d
-6.5	-3.2	-6.5	10 ~ 15min	>6d
-11.1	-0.2 ~ -1.9	-3.8	5 ~ 10min	

水过冷与水的体积有关。水体积愈小，结晶核形成的几率减小，过冷持续时间和程度增大。如薄膜水、小直径毛管水和岩石小裂隙中的水，过冷状态的稳定性提高。有人做过试验，把一滴水冷却到 -72°C 仍未结晶。

土中水的过冷温度取决于土的含水量。随着土的含水量减小，矿物颗粒表面对水分子的引力将阻碍水形成冰晶核，所以当土的含水量减少到接近最大分子吸水量时，土内水的过冷温度可降低约 $1 \sim 2^{\circ}\text{C}$ 。

在天然条件下，土中水的过冷只限于土的表层，因为表层冻结后，冰晶体已经深入土层下部，故下部不可能出现水的过冷现象。

现有关于土内水过冷与开始结晶的温度资料是用小体积扰动土样得出的。在此情况下，水的最低过冷温度为 -5°C ，而当土含水量较大且水中溶有大量溶质时，水的开始结晶温度接近 0°C ($-0.1 \sim -0.2^{\circ}\text{C}$)。

根据前苏联 А. П. Ёоженова 的室内试验，各种土的冻结和融化过程，其温度特征都可以分成 5 个阶段，见图 2.2、图 2.3。

在图 2.2、图 2.3 中：

I 为冷却过冷阶段。这个阶段土体在外界负温环境里逐渐冷却，并处于过冷状态。

II 为温度突变阶段。此时冰晶形成，水发生相变，放出潜热，土温跳跃式上升到土中水冻结温度。

III 为水结晶阶段。此阶段稳定并等于土中水的冻结温度。

IV 为进一步冷却阶段。自由水已经冻结，薄膜水的结晶需要更低的温度，随着薄膜水厚度不断减薄，土颗粒表面能对其吸附力增大，所以冻结温度必须愈低。冻结过程由 III 过

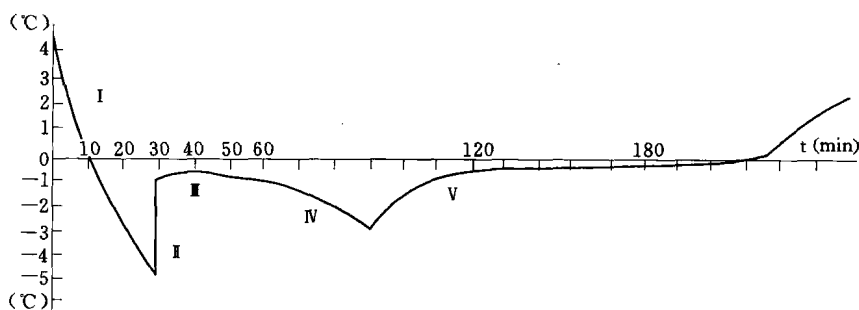


图 2.2 分散性膨润黏土的冷却—冻结曲线
(含水率 $\omega = 80.5\%$, 冷却液温度为 -10°C)

渡到IV。

V为融化阶段。外界温度升高,土中冰融化成水,这时需要吸收相变时潜热,所以土温保持相对稳定,当土中冰全部融化时,土温才明显上升。

试验表明,土中水在过冷以后,只要一开始结晶,由于释放潜热,土温开始上升,达到某一温度时就稳定下来,这时发生土孔隙中水的冻结过程,这一稳定温度称为起始冻结温度。

土的起始冻结温度与含水量、颗粒大小、矿物成分以及水溶液浓度有关。含水量越小,特别是当土的含水量接近于最大分子含水量时,由于土颗粒表面能作用,起始冻结温度愈低。土颗粒分散度愈大,起始冻结温度愈低。土中水含盐量增加时,起始冻结温度降低。

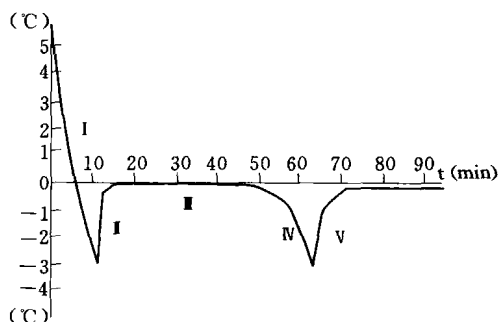


图 2.3 砂的冷却—冻结曲线
(含水率 $\omega = 19.6\%$, 冷却液温度为 -10°C)

2.3 土中水的基本分类

2.3.1 地下水的形成

水在地球上的空间分布有如下三种状态。

- (1) 空中的云和汽。
- (2) 地表的海洋、江河、湖泊。
- (3) 地面以下的土壤中和岩层里的水。

凡是存在于地面以下的水,统称为地下水。地下水中存在于土壤中的水称为地壤水,存在于岩石裂隙和空隙中的水称为裂隙水。

地下水的来源有如下四种。

- (1) 渗透作用:大气降水或地表水渗入地下。
- (2) 凝结作用:大气中的水汽进入土壤中,在负温条件下凝结成冰。这种现象在草

原和沙漠地带特别普遍和重要,因为在这些地区由这种方式获得的土中水比从天上水获得的水还要多。

(3) 原生水: 由于岩浆中水汽凝结而存在下来的水,它存在于地壳的深层。

(4) 化石水: 又称古水,是远古海洋残留水,在地质年代里,古海洋底部饱含海水的沉积岩,在海水冷却后,一部分被封存起来而从未参与循环的水。

2.3.2 地下水存在的形态

地下水存在于地下可以是气相、液相和固相,一般有如下几种形态。

(1) 气态水: 常是水蒸气和空气混合在一起,存在于土壤或岩石空隙中,遇冷后凝结成水。

(2) 颗粒表面结合水: 土体中细小颗粒具有很大的表面能,在粒径为 $10^{-7} \sim 10^{-4}$ cm 的颗粒表面都吸附着水分子,而且颗粒愈小其吸附力愈强。根据水与颗粒表面结合水的强度和性质,以及对土的性质影响的不同,矿物表面结合水可以分为吸附水和扩散膜水。

1) 吸附水又称吸着水或吸湿水,它是吸附层所含的水。吸着水是气态水冷凝后的水质点被吸附在土颗粒表面上,彼此吸附得很紧密。这种水一般不会移动,接近固态物质的性质,它只有变成气体才能移动。吸着水量小时,它呈不连续状态分布在颗粒表面,密度在 $1.2 \sim 2.4 \text{ g/cm}^3$ 之间。当吸着水量大时,它会发展成连续的水膜。吸着水膜最大厚度等于 $5 \sim 20$ 个水分子直径(厚度约为 $8 \times 10^{-6} \sim 13 \times 10^{-6}$ mm) 颗粒所吸附的最大水量称为最大吸着容水量。当吸着的水量超过最大吸着容水量时就出现另一种矿物表面结合水——扩散膜水。

2) 扩散膜水,又称薄膜水。扩散膜水位于扩散层中,并随着离颗粒表面距离的增大所受颗粒表面能的吸引力愈来愈小。它的黏滞性较大,密度约 1.25 g/cm^3 ,冰点低于 0°C 。薄膜水不受重力作用,但可从相邻的较厚水膜处向较薄的水膜处移动,但移动的速度很慢,不超过 $0.2 \sim 0.5 \text{ mm/h}$ 。薄膜水达到最大含量时称为最大分子容水量(包括吸着水和扩散膜水)。薄膜水的外层水接近自由水的性质。

(3) 毛细管水: 它存在于地下水面以上的土层的毛细管中,受毛细管力的作用,距地下水位愈近的土层其含水量愈大。毛管水上升高度与毛管直径有关,其可能上升的最大高度称最大毛管上升高度。

(4) 重力水: 在重力作用下在土层孔隙中运动的水。

(5) 固态水: 在高寒地区地下水以冰的形态存在于土层中。

2.4 冻土中水的相成分

土冻结后形成了一种新结构——冻土结构,它与未冻土的性质大不相同。冻土与未冻土的主要区别,除了冻土处于负温条件外,冻土中具有冰的胶结。冰与冻土骨架的胶结,受到许多因素的影响,首先是负温值,因为温度的变化,冻土中含冰量和未冻水量之间的比例也发生着变化,也即冻土中水的相成分的变化。

冻土中的水具有气态、液态和固态三种相态。

(1) 气态水: 冻土虽然处于负温,但仍然有气态水存在,在南极,甚至在 -40°C 时,

极地科学工作者仍发现有蒸汽。负温时蒸汽与正温时的一样，从高压处向低压处移动。

(2) 液态水：在负温条件下土中没有相变成冰的水。1940 年以前，人们普遍认为虽然土中水有过冷现象，但形成冰晶后，冻土中的水全部冻结成冰。直到 1942 年前苏联 А·Е·Федосов 研究多年冻土时验证，在 -70°C 的温度下，冻土中还含有一定数量的未冻水。

当土体温度在 0°C 时，自由水（实际上距土颗粒表面 0.005mm 的水基本上处于自由水状态）开始冻结；当温度在 $-1.0 \sim -0.1^{\circ}\text{C}$ 时，部分弱束缚水冻结；当温度在 $-30 \sim -20^{\circ}\text{C}$ 时，几乎全部扩散膜水冻结。但是吸附层水的冻结十分困难，在 -78°C 时吸附层外层水分子才开始冻结，但即使在 -186°C 时，也不会将全部的吸附层水变成冰。

据前苏联 З·Н·Нерсесова 的研究表明，每种土的未冻水量与土的总含水量无关，主要是受土的负温值控制。

值得指出的是，在负温条件下土中的未冻水含量是随温度而变化的，负温值下降时，未冻水量减少，当负温值减少时，就会有一部分冰重新转变为水，增大了未冻水含量。

(3) 固态水：冻土中的冰。这种冰在土中大孔隙中形成，粗粒土中往往形成冰包裹体，在细粒中常形成冰透镜体的冰夹层。

1945 年前苏联学者 Н·А·ЦЫТОВИЧ 提出了冻土中未冻水和冰的动平衡理论，指出在负温下，冻土中总有一部分未冻水，每一种土在某一负温和固定压力下，其未冻水含量是固定的。如果负温值下降或土中压力减少时，就会有一部分未冻水变成冰。反之，当负温值减少或压力增大时，就会有一部分冰变成未冻水。冻土中含水量主要是由未冻水含量和含冰量两部分组成，且二者之间始终处于动平衡状态。

2.5 冻土的物理特性

冻土是复杂的多相多成分体系，通常用肉眼判断冻土的土壤名称、结构和构造，但冻土的重要物理特性指标必须在实验室用专门的仪器设备进行测定，一般需要进行测定的物理特性指标有如下内容。

2.5.1 冻土的物理性质

1. 冻土的含水率

冻土含水率系指冻土中所含的冰的质量和未冻水质量之和与土骨架质量之比，用百分数（%）来表示。

冻土的含水率是研究冻土内在规律性的重要指标。冻土中的水分是最活跃的因素，它沿着深度的分布和随季节的变化而不断变化。它的变化规律与冻土的物理—力学性质有着密切关系。含水率大的土，一般冻胀性较大，对建筑物的危害也大。

根据定义，冻土含水率的公式如下：

$$\omega = \frac{W}{W_s} \quad (2.1)$$

式中 ω ——含水率，%；

W ——土中总含水量，g；