

Daolu Qiaoliang Donghai Jiqi Fangzhi

道路桥梁冻害及其防治

田德廷 戴惠民 编著

人 民 交 通 出 版 社

内 容 提 要

本书比较简明、深入地介绍了冻土的一些性质、冻胀的机理和发展规律以及对桥梁与公路的冻害作用等，对北方寒冷地区，特别是季节性冻土地区，从事桥梁与公路建设具有一定的参考价值。

全书共分六章，主要包括冻土的组成与构造、冻土中的水分迁移运动、土的冻结与冻胀、土的冻胀力、冻胀作用对桥梁与公路的危害及其防治措施等。其中一些主要计算方法为科研成果，已列入现行规范。

本书第1、2、3、6章由田德廷编写，第4、5章由戴惠民编写。

道路桥梁冻害及其防治

田德廷 戴惠民 编著

人民交通出版社出版

新华书店北京发行所发行

各地新华书店经售

人民交通出版社印刷厂印

开本：787×1092 $\frac{1}{32}$ 印张：8.25 字数：171千

1987年11月 第1版

1987年11月 第1版 第1次印刷

印数：0001—4,100册 定价：2.05元

目 录

第一章 冻土	1
第一节 冻土的概念	1
第二节 冻土的组成与构造	5
第三节 冻土的主要物理特性指标	10
第二章 冻土中的水分迁移运动	13
第一节 冻土中的水分重分布	13
第二节 水分迁移的形式与动力	15
第三节 水分迁移的原理	22
第三章 土的冻结与冻胀	25
第一节 土的冻结及其温度特征	25
第二节 冻土中的未冻水	30
第三节 土的冻胀及其规律	35
第四节 土冻胀的主要特征指标	40
第五节 影响土冻胀的基本因素	54
第六节 地基土冻胀性分类	75
第四章 土的冻胀力	80
第一节 冻胀力的概念	80
第二节 切向冻胀力	82
第三节 影响切向冻胀力的主要因素	88
第四节 切向冻胀力试验研究方法	101
第五节 切向冻胀力的取值	111

第六节	桩基冻胀反力	115
第七节	法向冻胀力	127
第八节	水平冻胀力	143
第五章	桥涵基础的冻害与防治	153
第一节	桥涵基础的冻害	153
第二节	桥涵墩台基础最小埋深	162
第三节	切向冻胀力作用下基础稳定和强度计算	167
第四节	公路桥钢筋混凝土桩切向冻胀力推荐值	180
第五节	桩基抗冻拔设计实例	187
第六节	桥涵基础冻害防治措施	192
第六章	道路工程的冻害及其防治	206
第一节	道路翻浆及其危害	206
第二节	道路翻浆的分类与分级	214
第三节	道路翻浆的防治	215
第四节	道路冰雪冻害	224
第五节	路面裂缝	228
第六节	低温抗裂指标	237
第七节	低温裂缝的防治	246
附图		255
参考文献		256

第一章 冻 土

第一节 冻土的概念

一、什么叫冻土

在含水的土壤中，当温度降低到 0°C 和 0°C 以下时，土壤冻结并伴随着冰体产生，同时由于冰的胶结作用，使土壤抗外力的强度提高，这种土壤称为冻土。如果只有负温作用，而无冰体形成，这种土壤称为寒土（或冷却土），而不能叫做冻土。

二、冻土的分类

1. 按冻结时间分类

根据冻结状态的持续时间，可分为季节冻土和永冻土（或多年冻土）两大类。季节冻土冬季冻结，夏季融化；永冻土（或多年冻土）的冻结持续时间相当长，从若干年到上千年，因此，可以看成是一种地质现象。例如，苏联西伯利亚北部某些地区的冻土层年龄估计有 1、2 万年到 28 万年。其表层的冻融循环现象较有规律地年年重复出现。在季节冻土中，有的只冻结几个小时或几天，称为临时冻土；有的在一、二个夏季内不融化的叫做隔年冻土；在一定条件下，如人们的生产活动等，隔年冻土可能发展而变成新生的多年冻土。

季节冻土是从地表开始冻结，而多年冻土则一般从地表以下若干深度开始冻结。

在多年冻土分布地区，冬季冻结和夏季融化的土层称为季节融冻层（或季节活动层）。

根据季节融冻层与下卧土层衔接情况，季节冻融层和多年冻结层衔接在一起的，叫做衔接冻土；季节冻融层和多年冻结层中间有一融化层的，或季节冻结层下面为融土的称为非衔接冻土。

2. 按物理状态分类

1) 坚硬冻土：被冰牢固胶结，在建筑物荷载作用下，表现出一定的脆性破坏和压缩变形很小的特点；

2) 塑性冻土：其中含有大量的未冻水，被冰胶结但具有粘滞性。其特点是在结构物荷载作用下有较低的压缩性；

3) 松散冻土：土中含水量很少，即使在冻结温度以下，也不为冰所胶结。一般砂、碎石土均属此类。这种土融化后力学性质不会发生很大改变。

三、我国的冻土分布^①

地球上陆地总面积为一亿四千九百五十万平方公里，多年冻土占整个陆地面积的五分之一，约三千万平方公里。而季节冻土分布地区更广。

我国幅员辽阔，在九百六十万平方公里的土地上有将近一百八十五~一百九十万平方公里的多年冻土，占我国领土面积的20%左右。它们主要分布在大小兴安岭的北部，青藏高原以及西南、西北部的高山颠峰和冰川外缘。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

^① 中国冻土分布图附于书后。

律，见表1。

我国一些地区多年冻土层的厚度

表1

地区	地点	纬度	海拔 (m)	年平均气温 (°C)	气温年较差 (°C)	年平均地温 (°C)	多年冻土厚度 (m)
东北	洛古河	53°20′	800	-5.0	52.5	-2.0~-2.5	50~100
	根河	50°41′	979.8	-5.2	46.8	-1.6	
	牙克石	49°24′	667	-2.8	46.4	-0.5	3~23
青藏高原	土门格拉	32°49′	4950	-5.2	25.3	-1.7~-2.4	70~80
	风火山	34°27′	4700	-4.9	24.1	-3.4~-4.0	120
	昆仑山口	35°30′	4780	-5.7	24.3	-3.0~-5.0	150~190
	祁连山木里	38°15′	4000	-5.5	24.2	-0.6~-2.3	30~95

我国的季节冻土分布十分广泛，从长江两岸开始，经大河上下遍及北方十余省市。黄河下游以南、长江以北地区，季节冻结层厚度一般不超过50cm。在我国北部地区，冻结层厚度几乎都超过50cm，明显呈现出我国季节冻土的纬度分带性。例如，黑龙江省的季节冻土，其冻结层厚度一般在2m左右，而处于多年冻土地区的洛古河一带，季节冻结层厚度可达4m以上，见表2。

我国一些地方季节冻结层厚度

表2

地点	北纬	海拔 (m)	年平均气温 (°C)	季节冻结层厚度 (cm)
南 京	32°00′	8.9	15.4	9
济 南	36°41′	55.1	14.1	39
北 京	39°57′	52.3	11.6	85
沈 阳	41°46′	41.6	7.6	>139
长 春	43°54′	236.8	4.7	162
哈 尔 滨	45°45′	146.0	3.7	197
嫩 江	49°10′	222.3	-0.7	208
洛 谷 河	53°20′	800	-5.0	400

四、季节冻土与公路、桥梁工程的关系

季节冻土与公路、桥梁工程的关系非常密切。在季节冻土地区修建的公路、桥梁、涵洞及其它人工构造物，经常由于土的冻胀作用而造成各种不同程度的冻胀破坏。主要表现在冬季低温时道路开裂、隆胀，桥梁桩基上拔、墩台倾覆、断裂，涵洞、隧道的裂缝；春融期间道路翻浆、路面沉陷等等。特别是在那些水文地质状态不良地带，其工程冻害现象更为严重。

人类的生产活动对冻土的温度影响也是非常大的。随着经济开发和公路建设的不断发展，使季节冻土层与大气的热交换条件发生重大变化，这不但将改变土的天然冻结深度和融化深度，同时也将改变整个冻土的物理、力学性质，使冻土的研究内容更加复杂化。

在一般公路、桥梁设计中，通常人们总是把强度、刚度和稳定性等做为基本力学指标来考虑。而土的冻胀性却常被人们所忽略。实践证明，在季节冻土地区的公路建设中，低温冻胀引起的过大变形和过大抗应力往往是路面强度、厚度和结构组合的关键因素；而在大批中小跨径桥梁墩台设计中，各种冻胀力又往往是控制荷载。因此，在季节冻土中，仍按以往那种用非冻地区的建筑理论来指导工程建设是不合理的。因为冻土作为地基来讲，不论是其成分、组成及物理、力学性质都与非冻土有很大差异，特别是冻土与环境之间的相互作用，对外界温度、压力、水分条件的反映远比非冻土敏感。所以，在季节冻土地区修桥筑路，一定要考虑土冻结和融化时的特点，认真了解土的冻胀特性，采取有效防治措施，减少和避免冻害的破坏作用。

第二节 冻土的组成与构造

一、冻土的基本成分及特性

冻土是一种复杂的多相、多成分体系。在结构上呈毛细多孔状，整体上表现出非均匀性和各向异性。冻土内部存在固体、液体、气体和塑性冰四相。这四种相态总是密切地相互约束、相互联系。单种成分的土只有在一定条件下，即在一定“容量”下才能存在。冻土的成分决定了冻土的结构、物理力学性质，并对冻结和融化过程给予决定性的影响。

冻土的固体部分由矿物骨架和极少数的有机沉积物组成。土颗粒的大小和形态、矿物成分、以及交换离子容量和成分等对冻土的特性具有重大的影响。

冻土的液体部分是指未冻水。这种水往往是溶解有各种可溶物质的自然水，它在冻土中是被吸附在颗粒表面作为吸附水而存在着，见图1。

其中，被土粒表面紧紧吸附住的吸附水（或强结合水），由于粒面有强大的电化分子吸力，所以，即使在很低的温度下也不冻结成冰。它一般被认为是不能移动的，但由于数量很少，且同土骨架的粘接强度又大，所以它对土的性质没有本质上的影

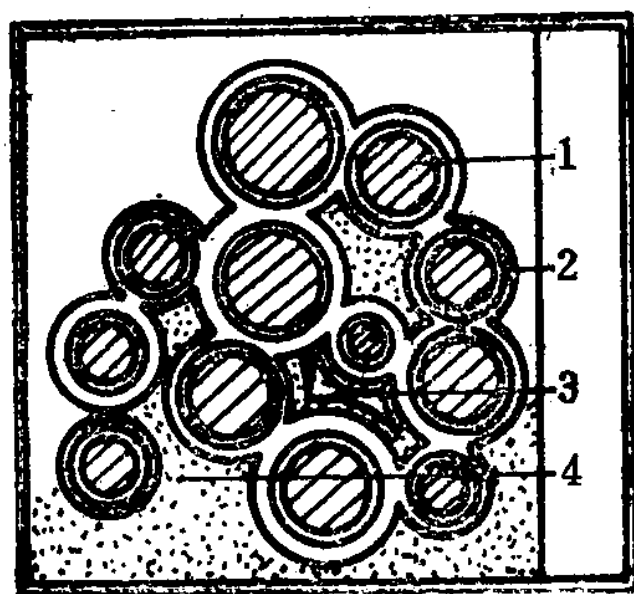


图1 土壤结构及土中水的类型
1-土壤颗粒；2-薄膜水；3-土壤孔隙之间的
气态水；4-土壤孔隙之间的毛细水

响。

其次，是薄膜水(或弱结合水)，分布于土粒子表面的外围。土冻结时这种水迁移很慢，并能释放结晶热，冻结温度一般低于 -1.5°C 。当吸附水层越薄，土粒子表面对它的作用越显著，冻结深度也越低。

还有一种就是很弱结合水。处于结合水和自由水之间，具有相当大的可移动性，是土冻结过程中发生水分集聚的主要来源，能产生极多的析冰和很大的冻胀。

冻土中的未冻水含量直接影响着冻土的物理力学特性。可以采集土样，用高敏度的测热器测定。

冻土的气相部分包括水蒸汽、空气、沼气以及其它气体。它们可以处于自由状态、吸附状态或密封状态。自由气体的数量取决于气体的孔隙度；吸附气体的数量与冻土骨架的数量、成分和孔隙有关。当冻土中含有有机质时，其含量显著增加。

冻土中的水汽总是从高温处向低温处移动。冻结时，水汽向冻结层迁移，凝结成滴液状并进而冻结，它是含水量小的砂性土冻结时水分集聚的主要水分来源。

冻土中，由于空气和其它气体存在于土壤空隙中，使土体弹性增加。

冻土中的塑性冰包括胶结冰和夹层冰。它们决定了冻土的结构特点及物理力学性质的特征。胶结冰是胶结土骨架及其团粒的细小冰体，一般是在含水量小的土冻结时或土快速冻结时形成的。胶结冰在生成过程中不发生土骨架颗粒的明显位移，是一种构造生成冰。

夹层冰是大小不等的冰体，主要是由向冻结层迁移来的弱结合水冻结生成的，大多以透镜体或不规则形状的形式存

在。在形成过程中土骨架之间发生位移。冰夹层和冰透镜体厚度从小于一毫米增加到数十厘米。

冰抵抗外力的强度在主轴方向比副轴方向大，可在很小的持续荷载作用下，产生粘塑变形，即流变。而仅在瞬时荷载作用下，冰体才具有弹性，但弹性值很低。在一定的温度和压力条件下，具有同素异构性，即一种形式的连续冰晶体可以变成另一种形式的冰晶体。

自由水在 0°C 和正常大气压力下，通过结晶生成普通冰。在上万个大气压力作用下可产生某些变态冰。

普通冰的一个特殊结构特性就是氢原子的活动性。它在温度和压力作用下经常不断地变化，只是在 -78°C 负温下才处于稳定状态。当温度低于 -70°C 时，冰由六角形结晶变成立方体结晶。随着温度上升，冰的强度降低。

冰一部分以细小的冰体部分或完全地填充土的孔隙，另外一些是以纯冰透镜体夹层的形式埋藏于冻土中。

二、冻土的构造

冻土的特征不仅在于物质成分，而且具有一定的结构，即各组成部分的尺寸、形态、空间相互位置等。

冻土的构造是指土的较大范围的空间位置，说明土的容积被土粒与冰等相充填的性质和程度。层状、片状、节理性质、裂隙等是构造的最重要要素。冻土的构造总是同土的组成部分在空间内的一定差异相联系的，没有差异便没有构造特点。

冻土的结构和构造表征土中冰体的大小、形状和分布。它们是在土体冻结过程中生成的，并取决于土的成分和构成特性、土的含水量及冻结条件（冻结速度、外部地下水的补

给条件)等。

根据冻土中冰体的形状、尺寸和分布,冻土可分为整体状构造、层状构造、网状构造及冰包裹状构造,见图2。

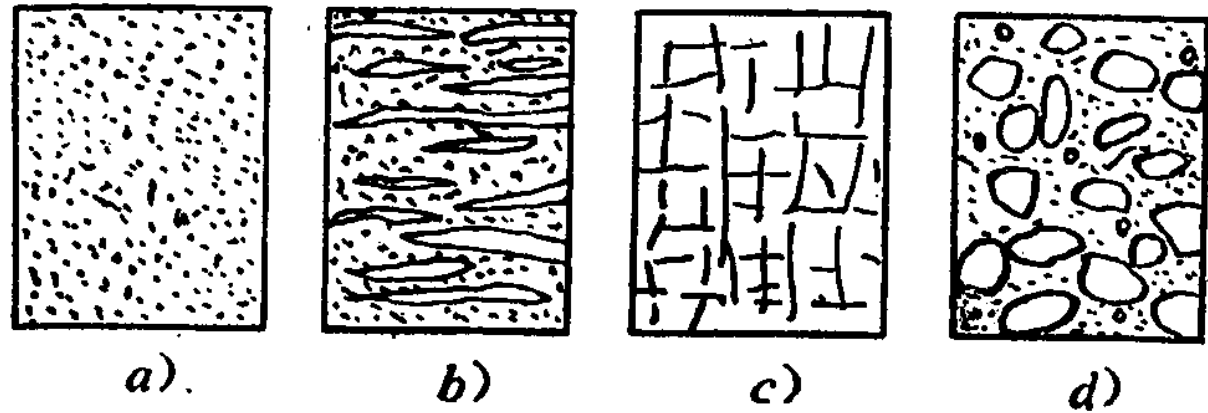


图2 冻土的基本构造

a)整体状构造; b)层状构造; c)网状构造; d)包裹状构造

1. 整体状构造〔见图2 a)〕

冻土中没有肉眼可见的明显冰体。它是在含水量小的土冻结又无地下水及时补给时,或在任何含水量下土快速冻结,下卧土层中的水分来不及迁移的条件下生成的。此时,较大一点冰体来不及析出,而仅仅生成胶结冰。冰晶体大小取决于土的孔隙大小及其含水量。

这种构造的冻土一般都有较高的强度,而且融化时强度的降低程度也较小,并由于冻结时水分重分布不显著,所以,冻胀也不明显,冻结前后物理、力学性质变化不大。

粗颗粒土容易形成整体状构造。

2. 层状构造〔见图2 b)〕

一般发生在具有高含水量或者有外来水补给条件下,主要是粉质类砂土、亚粘土及粘土在单向慢速冻结的情况下产生的,并同时产生离析冰。

在这些土中,当外界冷却强度较小,土中温度梯度小,则冻结锋面缓慢地向下推移。特别是含水量大,水相变时放

出大量潜热，使冻结锋面在某一位置停留时间长，水分自下卧土层中有充足的时间向上迁移，于是便形成冰层。水源越充分、冻结锋面稳定的时间越长，冰层形成的越厚。

层状构造的冻土冻结时将产生明显的冻胀，融化后又产生明显的沉陷，且承载能力大大降低，强度指标急剧下降，（抗剪强度可减少到1/5以下），土常常变成触变性流砂状态。

层状构造的冻土分布很广，根据冰夹层的厚度，可分为以下几种形式：

微层状构造（ $<0.1\text{cm}$ ）、细层状构造（ $0.1\sim0.5\text{cm}$ ）、中等层状构造（ $0.5\sim2.0\text{cm}$ ）、厚层状构造（ $>2.0\text{cm}$ ）。

3.网状构造〔见图 2 c〕

网状构造的冻土是在水源补给较充分，并在多向冻结条件下形成的。在冻结过程中，不同尺寸、不同形状和不同方位的冰体，形成大小不一的、不连续的网或框格状的构造。有时也可由于土质不均匀，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，形成网状构造。

网状构造的冻土，主要产生在细颗粒土中，具有很大的冻胀性，融化时发生沉陷，承载力降低。

网状构造按冰脉之间距离又可分成细网状（密网状）、中网状和粗网状构造。

4.包裹状构造〔见图 2 d〕

广泛分布于粗碎石土及带有砂质粘土充填物的小漂石中。其特征是不同厚度的冰土硬壳部分或全部包裹粗碎石。在漂石中常常以不连续的硬壳仅覆盖碎石部分表面；而在较细的碎石（小卵石）上，则多以纯冰或由冰土混合物组成的

硬壳覆盖整个表面。

这种构造冻土只有一般的冻胀性，具有较高的承载能力和很小的压缩性。但融化时，将发生很大的沉陷。

第三节 冻土的主要物理特性指标

由于冻土是固、塑（冰）、液和气体四种成分体系构成的复合物，它的物理性质与未冻前有很大的区别和变化，因此，至少需要用四种基本指标来表现其物理特性。一般采用下列指标：

一、冻土密度

是土在冻结状态下单位体积的重量。

冻土密度是表示它的天然压实度最重要的指标，也是冻土地区建筑物设计中计算冻结（或融化）深度、冻胀、融化下沉、保温层厚度以及检算地基强度等方面不可缺少的重要指标。

冻土密度用下式计算：

$$\gamma_0 = \frac{g_{s.0}}{V_{s.0}} \quad (1)$$

式中： γ_0 ——冻土密度， kg/m^3 ；

$g_{s.0}$ ——未被扰动的冻土试样重量， kg ；

$V_{s.0}$ ——试样的体积， m^3 。

冻土密度的测定必须在气温为负温度条件下进行。

土在冻结时，由于水相变成冰，体积膨胀，使整个土的体积较之冻前增大。所以在土的矿物成分、含水量相同条件下，冻土密度较之未冻前为小。

二、冻土含水量

冻土含水量是研究冻土内在规律性的重要指标。冻土中水是最活跃的因素，它随着深度和季节的变化而变化。含水量大的土，一般冻胀性大，对建筑物的危害相应也大。在工程上，往往直接采用冻土含水量指标进行冻胀及融沉评价。

冻土含水量用下式计算：

$$W = \frac{g_w}{g_s} \quad (2)$$

式中： W ——冻土含水量，%；

g_w ——冻土所含之水重（包括水与冰）， g ；

g_s ——干土重， g 。

冻土中的水包括未冻水和冰两部分。所以冻土含水量应是水和冰的总含水量。

三、冻土中未冻水含量 W_u (%)

在任何负温条件下，冻土中都存在着不同数量的未冻水。在天然冻土情况下，可根据冻土的负温值与塑性指数间的函数关系，近似地按公式（2）来求算。

四、冻土含冰量（含冰率）

冻土的含冰量是指冻土中含各种类型冰之总和。如同含水量一样，是冻土物理状态和性质的重要指标，在热物理计算、土冻结状态下的承载能力计算及融化下沉量计算中都要运用它。

冻土含冰量（含冰率）一般可用重量含冰量和体积含冰量来表示。

体积含冰量是指冻土内部冰的容积（整块较厚冰夹层除外，它们与冻土内部冰是分开测定的）与冻土容积之比；重量含冰量是指冻土内部冰的重量与冻土重量之比。体积含冰量对冻土来说是更具典型性的特征值。

工程中常用相对含冰量作指标，用下式表示：

$$i_0 = \frac{g_i}{g_w} \quad (3)$$

式中： i_0 ——相对含冰量，%；

g_i ——冻土中含冰重量，g；

g_w ——冻土中含水总量，g。

冻土中的水和冰，在相变过程中总是处于动态平衡状态。

根据冻土的上述各基本物理特性指标，不难求算出冻土内部各部分的含量；除此以外，还可以求算冻土其它许多物理特性指标，诸如：空隙系数、水饱和系数（即实际水量占全部充满孔隙的水量百分比）以及冻土单位体积中所含气体体积等。