



普通高等教育“十三五”规划教材

水利工程 抗冻技术教程

主 编 王海娟 程建军 李东升
副主编 刘建军 余书超



中国水利水电出版社
www.waterpub.com.cn

普通高等教育“十三五”规划教材

水利工程 抗冻技术教程

主 编 王海娟 程建军 李东升

副主编 刘建军 余书超



中国水利水电出版社

www.waterpub.com.cn

内 容 提 要

本教材共分为 8 章, 主要内容包括绪论, 冻土及其物理性质, 土的冻胀及冻胀力, 刚性护面渠道冻胀破坏分析与防治技术, 板式基础冻胀破坏分析与防治技术, 平原水库土坝护坡冻害与防治技术, 桩、墩式基础冻胀破坏分析与防治技术, 支挡建筑物冻胀破坏分析与防治技术。

本教材可作为高校水利水电工程、农业水利工程、土木工程、给水排水工程专业教材, 也可供相关专业的师生学习和参考。

图书在版编目 (C I P) 数据

水利工程抗冻技术教程 / 王海娟, 程建军, 李东升
主编. — 北京: 中国水利水电出版社, 2016. 1
普通高等教育“十三五”规划教材
ISBN 978-7-5170-3825-2

I. ①水… II. ①王… ②程… ③李… III. ①水利工程—抗冻性—高等学校—教材 IV. ①TV

中国版本图书馆CIP数据核字(2016)第018656号

书 名	普通高等教育“十三五”规划教材 水利工程抗冻技术教程
作 者	主编 王海娟 程建军 李东升 副主编 刘建军 余书超
出版发行	中国水利水电出版社 (北京市海淀区玉渊潭南路 1 号 D 座 100038) 网址: www. waterpub. com. cn E-mail: sales@waterpub. com. cn 电话: (010) 68367658 (发行部)
经 售	北京科水图书销售中心 (零售) 电话: (010) 88383994、63202643、68545874 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	北京瑞斯通印务发展有限公司
规 格	184mm×260mm 16 开本 9.75 印张 232 千字
版 次	2016 年 1 月第 1 版 2016 年 1 月第 1 次印刷
印 数	0001—2000 册
定 价	25.00 元

凡购买我社图书, 如有缺页、倒页、脱页的, 本社发行部负责调换

版权所有·侵权必究

前言

我国是第三冻土大国，冻土区（包括多年冻土和季节冻土）约占国土面积的70%左右，主要分布于东北、西北、华北等广大地区，这些地区除部分多年冻土区，其余均为季节性冻土区。冬季气候寒冷，造成地表土层不同程度的冻结，水面结成冰盖，春夏转暖时全部融化，这种现象称为年季节性冻结和融化。大地及河湖在年季节冻结和融化过程中，将发生一系列物理力学性质的变化，诸如地表冻胀隆起、融化沉陷及冰层膨胀等现象，使许多坐落在土基上和以土、水为环境的各类建筑物，受到种种动力作用而产生不同部位、不同形式和不同程度的破坏，称为冻害。尤其以土和水为环境水利工程冻害最为严重。冻害严重影响了现有工程效益的发挥和新建工程的安全，因此研究冻土性质及水利工程冻害破坏机理，采取有效的抗冻技术，对水利工程建设及发展有着至关重要的作用。

中国冻土研究起步相对较晚，新中国成立初期，主要是中国科学院兰州冰川冻土研究所、铁道第二设计院等单位从事冻土的研究工作。20世纪70年代末，我国冻土研究进入了高潮，水利工作者做出了大量的理论和试验研究及调查工作，取得了丰硕的成果。例如水利部颁布的《渠系工程抗冻设计规范》（SL 23—91，SL 23—2006）、《水工建筑物抗冰冻设计规范》（SL 211—98，SL 211—2006）。国内冻土研究学者，出版了《土的冻胀与建筑物冻害防治》（童长江等）、《冻土路基工程》（吴紫汪等）、《水工建筑物冻害及防治》（水电部东北勘测设计院等）、《冻土物理学》（徐学祖等）、《中国冻土》（周幼吾等）一批著作。为工程冻害防治技术奠定了坚实的理论基础，积累了大量的冻害防治的方法措施。

本教材共8章内容，第1章绪论部分，主要阐述冻土分布、冻土引起的工程冻害、研究现状相关内容。第2、3章是基础章节，阐述了冻土的基本概念及分类；冻土物理力学性质；冻土热学性质；土体的冻胀及有关的指标的计算；土体冻结过程中的水分迁移机理及温度特征；影响土体冻胀的因素；土的切向冻胀力、法向冻胀力、水平冻胀力等相关内容。第4~8章分别阐述刚

性护面渠道、板式基础、平原水库土坝护坡、桩（墩）式基础、支挡建筑物冻胀破坏分析与防治技术。

本教材第1章由程建军编写，第2章由刘建军、余书超、王海娟编写，第3、5、6、7、8章由王海娟编写，第4章由李东升编写。

本教材是编者在多年从事水利工程抗冻技术教学研究过程中，收集大量资料编写而成的。在编写过程中参阅了有关参考文献和著作，并引用了一些图表，在此特向原作者表示衷心的感谢。

由于编者水平有限，书中难免存在错误和不妥之处，恳请各位专家、同仁、读者提出批评指正和建议。

编者

2015年9月

目 录

前言

第 1 章 绪论	1
1.1 冻土分布	1
1.2 工程冻害	2
1.3 冻土研究概况	2
1.4 本教材的主要内容	3
第 2 章 冻土及其物理性质	4
2.1 冻土及其分类	4
2.2 冻土的物理力学性质	11
2.3 冻土的热学性质	17
思考题	24
第 3 章 土的冻胀及冻胀力	26
3.1 土的冻胀	26
3.2 土体冻结过程中的水分迁移机理及温度特征	29
3.3 影响土体冻胀的因素	32
3.4 土的切向冻胀力	37
3.5 土的法向冻胀力	39
3.6 土的水平冻胀力	43
思考题	48
第 4 章 刚性护面渠道冻胀破坏分析与防治技术	49
4.1 概述	49
4.2 刚性护面渠道冻害破坏分析	50
4.3 刚性护面渠道抗冻胀计算	57
4.4 刚性护面渠道冻胀时衬砌板受力分析	60
4.5 刚性护面渠道抗冻胀破坏设计	63
4.6 刚性护面渠道抗冻胀措施	70
思考题	75

第 5 章 板式基础冻胀破坏分析与防治技术	77
5.1 概述	77
5.2 板式基础冻胀破坏分析	77
5.3 板式基础抗冻胀工程措施	82
5.4 板式基础抗冻胀结构措施	87
思考题	93
第 6 章 平原水库土坝护坡冻害与防治技术	95
6.1 作用于土坝护坡的冰压力	95
6.2 静冰压力及土坝护坡抗冰推稳定计算	99
6.3 冰对土坝护坡的破坏	102
6.4 平原水库土坝护坡冻害防治措施	105
6.5 平原水库土坝混凝土护坡抗冻胀设计	111
思考题	114
第 7 章 桩、墩式基础冻胀破坏分析与防治技术	115
7.1 概述	115
7.2 桩、墩式基础冻害特征	115
7.3 桩、墩式基础抗冻拔稳定与强度验算	118
7.4 桩、墩式基础抗冻胀工程措施	122
7.5 桩、墩式基础抗冻胀结构措施	125
思考题	127
第 8 章 支挡建筑物冻胀破坏分析与防治技术	128
8.1 支挡建筑物冻胀破坏分析	128
8.2 支挡建筑物抗冻胀工程措施	132
8.3 支挡建筑物抗冻胀结构措施	139
8.4 支挡建筑物抗冻胀设计	143
思考题	147
参考文献	148

第 1 章 绪 论

1.1 冻 土 分 布

1. 世界冻土分布

地球上多年冻土总面积约为 3500 万 km^2 ，主要分布在北半球。包括欧亚大陆的西伯利亚和北美大陆的阿拉斯加及加拿大广阔地区的多年冻土，约占全球多年冻土总面积的 63%。冻土在地球上的分布具有明显的纬度地带性和高度地带性。在水平方向和垂直方向上，多年冻土带可分为连续多年冻土带、不连续多年冻土带和岛状多年冻土带。在纬度地带性上，自高纬度向中纬度，多年冻土埋深逐渐增加，厚度不断减小，年平均地温相应升高，由连续多年冻土带过渡到不连续多年冻土带、季节冻土带。

围绕极地的高纬度多年冻土，分布具有明显的纬度地带性，在北半球自北而南多年冻土分布的连续性减小。北部为连续多年冻土带，通常以 -5°C 年平均气温等值线作为分布的南界。往南形成连续或广布多年冻土带，其南界大致与 -4°C 年平均气温等值线相符。再往南为高纬度多年冻土区的南部边缘地区，形成岛状或散布多年冻土带，其南部界限即为多年冻土南界，多年冻土以南界以南、一定海拔高度上出现的多年冻土称为高海拔多年冻土，其分布有明显的垂直地带性，厚度一般自多年冻土出现的最低界限（多年冻土下界）往上，随高度的递增而增加，多年冻土南界以南还分布有残余多年冻土。残余多年冻土有时出现在多年冻土区的南缘的地下深处，与现代多年冻土一起构成双层多年冻土。

2. 我国冻土分布

我国是第三冻土大国，冻土区（包括多年冻土和季节冻土）约占国土面积的 70%，主要分布在东北北部地区及西部高山区。其中多年冻土分布区，占国土面积的 21.5%，主要分布在大小兴安岭的北部，青藏高原及西南西北之巅和冰川外缘。

东北冻土区为欧亚大陆冻土区的南部地带，冻土分布具有明显的纬度地带性规律，自北而南，分布的面积减少。该地区有宽阔的岛状冻土区（南北宽 200~400km），其热状态很不稳定，对外界环境因素改变极为敏感。东北冻土区的自然地理南界变化在北纬 $46^{\circ}36' \sim 49^{\circ}24'$ ，是以年均温 0°C 等值线为轴线摆动于 0°C 和 $\pm 1^{\circ}\text{C}$ 等值线之间的一条线。

西部高山高原和东部一些山地，一定的海拔高度以上（即多年冻土分布下界）才有多年冻土出现。冻土分布具有垂直分带规律，如祁连山热水地区海拔 3480m 出现岛状冻土带，3780m 以上出现连续冻土带；前者在青藏公路上的昆仑山上分布于海拔 4200m 左右，后者则分布于 4350m 左右。青藏高原冻土区是世界中、低纬度地带海拔最高（平均 4000m 以上）、面积最大（超过 100 万 km^2 ）的冻土区，其分布范围北起昆仑山，南至喜马拉雅山，西抵国界，东缘至横断山脉西部、巴颜喀拉山和阿尼马卿山东南部。青藏高原多年冻土基本呈连续或大片分布，温度低、地下冰厚度大。在青藏高原地势西北高、东南

低, 年均温和降水分布西、北低, 东、南高的总格局影响下, 冻土分布面积由北和西北向南和东南方向减少。高原冻土最发育的地区在昆仑山至唐古拉山南区, 本区除大河湖融区和构造地热融区外, 多年冻土基本呈连续分布。往南到喜马拉雅山为岛状冻土区, 仅藏南谷地出现季节冻土区。中国高海拔多年冻土分布也表现出一定的纬向和经向的变化规律。冻土分布下界值随纬度降低而升高。二者呈直线相关。冻土分布下界值中国境内南北最大相差达 3000m, 除阿尔泰山和天山西部积雪很厚的地区外, 下界处年均温由北而南逐渐降低 (由 $-3\sim-2^{\circ}\text{C}$ 以下)。西部冻土下界比雪线低 1000~1100m, 其差值随纬度降低而减小。东部山地冻土下界比同纬度的西部高山一般低 1150~1300m。

1.2 工 程 冻 害

我国东北、西北、华北等广大地区, 冬季气候寒冷, 造成地表土层不同程度的冻结, 水面结成冰盖, 春夏转暖时全部融化。这种现象称为年季节性冻结和融化。大地及河湖在年季节冻结和融化过程中, 将发生一系列物理力学性质的变化, 诸如地表冻胀隆起、融化沉陷及冰层膨胀等现象, 使许多坐落在土基上和以土、水为环境的各类工程和建筑物, 受到种种动力作用而产生不同部位、不同形式和不同程度的破坏。这就是我们所称的冻害。无论是水利工程、建筑工程还是路桥工程等都存在着冻害问题。20 世纪 70 年代, 据调查资料统计, 黑龙江省查哈阳灌区支渠以上的 112 座建筑物 (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), 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, 造成的经济损失达数千万, 而且还严重影响了水利工程效益的发挥。

1. 水利工程冻害

渠系工程中涵闸、渡槽、跌水、陡坡、渠道、倒虹吸等建筑物因受冻胀、融沉、冰压力和冻胀力的作用, 冻害破坏最为严重。渠系工程破坏特征首先以裂缝和断裂最为普遍。其次是融沉与倾覆, 冬季冻结春季融化, 地基土含水量增加、强度降低, 在建筑物荷载作用下产生沉陷, 不均匀沉陷导致建筑物倾斜, 甚至倾覆破坏。板式基础在法向冻胀力的作用下, 建筑物整体或部分隆起或上抬; 桩柱基础在切向冻胀力的作用下被拔起或拔断; 衬砌渠道产生裂缝、鼓胀、隆起架空、整体上抬滑塌等。

2. 路桥冻害

铁路、公路路基工程因冻胀引起的路基变形, 冻胀引起路基不平, 路面产生裂缝, 一般呈纵向分布, 严重时造成路面破碎。桥梁墩柱冻拔上抬, 桥面隆起, 桥台翼墙裂缝倾覆倒塌。更为严重的是, 春季到来, 路基土融化, 含水量增加, 路基中水分不能及时排出, 形成潮湿软弱状态, 路基承载能力降低, 在车辆通过时, 造成路面鼓包, 翻浆冒泥, 影响行车, 甚至中断交通。

1.3 冻 土 研 究 概 况

世界冻土研究的国家主要有苏联、美国、加拿大、瑞典、日本、挪威和中国, 苏联研

究处于世界前列,取得了丰硕的成果。如1940年由M. N. 苏姆金编写的《普通冻土学》一书,主要通过现场调查手段研究冻土成因、成分、性质、组构、分布及其与发生在冻土中的地质作用、地球化学作用和生物作用的关系。《普通冻土学》是第一部冻土学教科书。此外,1952年H. A. 崔托维奇出版了《冻土力学原理》一书,主要研究冻土的强度和变形特性及其在工程实践的应用。1958年由原苏联科学院出版社出版了H. A. 崔托维奇《冻土上的地基与基础》一书,论述了冻土的基本物理、力学性质,冻土中的物理力学过程及冻土上基础设计、施工方法。

中国冻土研究起步相对较晚,新中国成立初期,主要是中国科学院兰州冰川冻土研究所、铁道第二设计院等单位从事冻土的研究工作。水利工程冻害研究是从20世纪50年代开始的,主要对负温条件下土方施工、冬季土坝防渗铺盖问题结合实际工程进行研究,为寒区土方施工提供了依据,并出版了《碾压式土坝的冬季施工》一书。20世纪70年代末,我国冻土研究进入了高潮,成立了全国抗冻技术联合组织、抗冻技术科学研究协作组和抗冻技术情报网,召开了多次全国冰川冻土学术会议,多次参加国际冻土学学术会议。中国科学院兰州冰川冻土研究所、水利部东北勘测设计院、黑龙江水利科学研究院、黑龙江低温研究所、辽宁省水利科学研究所、铁道部设计院等一批教学、科研、生产单位密切结合生产实践,进行了大量的调查和室内外试验,从理论和实践上取得了大批科研成果。在冻土物理力学性质、土的冻胀分类、土的冻胀预报、冻害机理、冻害防治、抗冻胀计算等方面发表了多篇论文。在水利、工业与民用建筑等行业颁布了有关冻土工程的规范,例如:《渠系工程抗冻设计规范》(SL 23—91, SL 23—2006)、《水工建筑物抗冰冻设计规范》(SL 211—98, SL 211—2006)、《建筑桩基基础设计规范》(JGJ 94—94)、《冻土地区建筑地基基础设计规范》(JGJ 118—98)、《公路桥涵地基与基础设计规范》(JTJ 024—85)等。国内冻土研究的学者,出版了《土的冻胀与建筑物冻害防治》(童长江等)、《冻土路基工程》(吴紫汪等)、《冻融土中水热运输问题》(李述训等)、《冻土物理学》(徐学祖等)、《中国冻土》(周幼吾等)一批著作。关于冻土的研究还远远没有结束,许多基础理论和生产实践问题还需要进一步研究和完善。随着我国经济的发展和国力的增强,我国冻土研究必将取得更大的成绩。

1.4 本教材的主要内容

本教材共8章内容,第1章绪论部分,主要阐述冻土分布、冻土引起的工程冻害、研究现状相关内容。第2、3章本教材的基础章节,阐述了冻土的基本概念及分类;冻土物理力学性质;冻土热学性质;土体的冻胀及有关的指标的计算;土体冻结过程中的水分迁移机理及温度特征;影响土体冻胀的因素;土的切向冻胀力、法向冻胀力、水平冻胀力等相关内容。第4~8章分别阐述刚性护面渠道、板式基础、平原水库土坝护坡、桩(墩)式基础、支挡建筑物冻胀破坏分析与防治技术。

第2章 冻土及其物理性质

2.1 冻土及其分类

2.1.1 冻土

冻土是指温度在 0°C 或 0°C 以下含有冰胶结层的各种岩石和土壤，是一种复杂的多相、多成分的复合体。如果只有负温而没有冰胶结层的土层称为寒土。冻土在结构上呈毛细多孔状，整体上是非均匀和各向异性的。冻土的基本成分是矿物或矿体骨架（固相）、冰、未冻水和气体，它们决定着冻土的结构、物理力学和热物理性质，并影响着土体冻结和解冻过程。

1. 骨架（固相）

冻土的骨架（固相）由土颗粒和负温矿物组成，是冻土多成分体系的主体。矿物颗粒大小、形状、矿物成分、比表面积、表面活性等反映其表面物理化学性质的交换阳离子成分和交换量，极大地影响了土的结构构造特性、水分迁移机制、强度，以及冻结时冰的形成和冻胀量等。

2. 冰

冰是冻土存在的基本条件，是冻土的必然组成成分。冻土中的冰一般称为地下冰，其形成和融化致使冻土层的结构发生特殊的变化，使冻土具有特殊的物理力学性质。地下冰形成过程可分为三种类型：构造冰，在岩石冻结时形成，对冻土的结构形成和性质具有重要意义，对冰和骨架的数量关系以及它们在土内的相互位置有影响；穴脉冰，冻结岩石中的孔穴被冰充填而成；埋藏冰，包括各种成因的埋藏的地面冰，其形成为两个阶段：地面上形成的地面冰，及随后在矿物冲积层形成的埋藏冰。地面冰是由于地面覆盖雪变成冰而形成的，有河川埋藏冰、湖泊埋藏冰、冰锥埋藏冰等，埋藏雪属于第二种埋藏冰。

3. 未冻水

冻土中的液相是指其中的未冻水。土体冻结是随时间变化的、复杂的热过程。不同土体起始冻结温度不同，当土的温度降低到起始冻结温度以下时，部分孔隙水开始冻结。随着温度进一步降低，土中未冻水的含量逐渐减少，但不论温度有多低总有一部分水保持未冻状态而与冰共存。未冻水主要是结合水。因结合水受到土粒表面静电引力的作用，要使其冻结，除要克服普通液态水分子引力外，还要克服土粒表面对水分的引力。因此结合水的冰点较低，一般弱结合水在 $-20\sim-30^{\circ}\text{C}$ 才开始冻结，强结合水在 -78°C 才冻结。冻土中未冻水含量对其力学性质影响很大。未冻水含量取决于冷却温度和压力，以及矿物骨架或有机矿物骨架的性质。

4. 气体

冻土的气相包括水蒸气、空气、沼气以及其他气体。处于自由和吸附式封闭状态。自由气体的数量取决于土的孔隙度，吸附式封闭气体的数量与冻土颗粒的数量、成分和孔隙大小及冻土中有机质含量有关。

2.1.2 冻土分类

冻土分类有多种形式。冻土可按冻土层存在时间长短、泥炭化程度、体积压缩系数、总含水量及盐渍度、平面分布特征、冻胀率、融化下沉系数、冻结特征和冰层厚度等进行分类。

1. 根据在自然条件下冻土层存在时间长短分类

(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，夏季全部融化的土。

(3) 隔年冻土——冬季冻结，一两年内不融化的土。

(4) 多年冻土——冬季冻结，冻结时间延续 3 年及 3 年以上，甚至长达一个世纪或几千年的土层。

2. 根据泥炭化程度分类

泥炭化程度指单位体积中含植物残渣和成泥炭的质量与冻土干密度的比值，工程中用百分数表示。

冻结泥炭化土的泥炭化度 ξ 按下式计算：

$$\xi = \frac{m_p}{g_d} \times 100\% \quad (2.1)$$

式中 m_p ——土中含植物残渣和成泥炭的质量，g。

g_d ——土骨架质量，g。

按冻结泥炭化土的泥炭化程度 ξ 分为：对粗颗粒冻土，当 $\xi > 3$ 时，为泥炭化冻土；对黏性冻土，当 $\xi > 5$ 时，为泥炭化冻土。

3. 按盐渍度分类

盐渍度指单位体积中含易溶盐的质量与冻土干密度的比值，工程中用百分数表示。

盐渍化冻土的盐渍度 ζ 用下式计算：

$$\zeta = \frac{m_g}{g_d} \times 100\% \quad (2.2)$$

式中 m_g ——土中含易溶盐的质量，g。

按盐渍度 ζ 判定，归属于盐渍化冻土的是：对粗粒土， $\zeta > 0.1$ ；对粉土， $\zeta > 0.15$ ；对粉质黏土， $\zeta > 0.2$ ；对黏土， $\zeta > 0.25$ 。

4. 按冻土的平面分布特征分类

多年冻土根据融区的存在与否及融区的大小分为：

(1) 零星分布多年冻土。冻土面积仅占 5%~30%，绝大部分为融区。

(2) 岛状分布多年冻土。冻土面积占 40%~60%，冻土以岛状分布在融土区中。

(3) 断续分布多年冻土。冻土面积占 70%~80%，融区呈岛状分布。

(4) 整体分布多年冻土。也称连续分布多年冻土，冻土面积大于 90%，仅在大河或大湖底部及地热异常地带（如温泉）无冻土分布。

其中零星分布多年冻土、岛状分布多年冻土、断续分布多年冻土均属于非整体多年冻土。

5. 按冻土的压缩变形系数和总含水量分类

(1) 坚硬冻土： $\alpha \leq 0.01 \text{MPa}^{-1}$ 或 $m_v \leq 0.01 \text{MPa}^{-1}$ ，可近似看成不可压缩土。土中未冻含水量很少，土粒被冰牢固胶结，土体压缩性很小，在荷载作用下表现为脆性破坏，与

岩石相似。当土的温度低于下列数值时，呈坚硬冻土：粉砂 -0.30°C ；粉土 -0.60°C ；粉质黏土 -1.0°C ；黏土 -1.5°C 。

(2) 塑性冻土： $a>0.01\text{MPa}^{-1}$ 或 $m_v>0.01\text{MPa}^{-1}$ ，为塑性冻土。土中含大量未动水，土的强度不高，压缩性较大，当土体温度低于 0°C 以下至坚硬冻土温度是上限之间，饱和度 $S_r<80\%$ 时，冻土呈塑性，受力计算变形时应计入压缩变形量。

(3) 松散冻土：冻土中总含水量不大于 3% ，土粒为被冰所胶结，粒间互不连续仍保持结冰前散体状态。其力学性质与未冻土体无太大差别，所以称为松散冻土。砂土和碎石土常呈松散冻土。

6. 按冻土的冻胀率分类

根据《建筑地基基础设计规范》(GB 50007—2002)中根据土类（主要是粒径成分）、土中天然含水量和与地下水关系，把土按冻胀性强弱分为5级，见表2.1。

表 2.1 季节冻土的冻胀分类

土 的 名 称	冻前天然 含水量 $\omega/\%$	冻结期间地下水位 距冻结面的最小 距离 h_w/m	平均冻胀率 $\eta/\%$	冻胀 等级	冻胀类别
碎（卵）石，砾、粗、中 砂（粒径小于 0.075mm 颗 粒含量大于 15%），细砂 （粒径小于 0.075mm 颗粒含 量大于 10%）	$\omega\leq 12$	>1.0	$\eta\leq 1$	I	不冻胀
		≤ 1.0	$1<\eta\leq 3.5$	II	弱冻胀
	$12<\omega\leq 18$	>1.0			
		≤ 1.0	IV	强冻胀	
	$\omega>18$	>0.5			$6<\eta\leq 12$
		≤ 0.5			
粉砂	$\omega\leq 14$	>1.0	$\eta\leq 1$	I	不冻胀
		≤ 1.0	$1<\eta\leq 3.5$	II	弱冻胀
	$14<\omega\leq 19$	>1.0			
		≤ 1.0	IV	强冻胀	
	$19<\omega\leq 23$	>1.0			$6<\eta\leq 12$
		≤ 1.0	V	极强冻胀	
	$\omega>23$	不考虑			$\eta>12$
	粉土	$\omega\leq 19$	>1.5	$\eta\leq 1$	I
≤ 1.5			$1<\eta\leq 3.5$	II	弱冻胀
$19<\omega\leq 22$		>1.5			
		≤ 1.5	IV	强冻胀	
$22<\omega\leq 26$		>1.5			$6<\eta\leq 12$
		≤ 1.5	V	极强冻胀	
$26<\omega\leq 30$		>1.5			$\eta>12$
		≤ 1.5			
$\omega>30$		不考虑			

续表

土 的 名 称	冻前天然 含水量 $\omega/\%$	冻结期间地下水位 距冻结面的最小 距离 h_w/m	平均冻胀率 $\eta/\%$	冻胀 等级	冻胀类别
黏 性 土	$\omega \leq \omega_p + 2$	>2.0	$\eta \leq 1$	I	不冻胀
		≤ 2.0			
	$\omega_p + 2 < \omega \leq \omega_p + 5$	>2.0	$1 < \eta \leq 3.5$	II	弱冻胀
		≤ 2.0			
	$\omega_p + 5 < \omega \leq \omega_p + 9$	>2.0	$3.5 < \eta \leq 6$	III	冻胀
		≤ 2.0			
	$\omega_p + 9 < \omega \leq \omega_p + 15$	>2.0	$6 < \eta \leq 12$	IV	强冻胀
		≤ 2.0			
	$\omega > \omega_p + 15$	不考虑	$\eta > 12$	V	极强冻胀

注 1. ω_p 为塑限含水量, %。
2. 盐渍化冻土不在表列。
3. 塑性指数大于 22 时, 冻胀性降低一级。
4. 粒径小于 0.005mm 颗粒含量大于 60%, 为非冻胀土。
5. 碎石类土当充填物大于全部质量的 40% 时, 其冻胀性按充填物土的类别判断。
6. 碎石土、砾砂、粗砂、中砂 (粒径小于 0.075mm 颗粒含量不大于 15%)、细砂 (粒径小于 0.075mm 颗粒含量不大于 10%) 均按不冻胀考虑。

冻土层平均冻胀率 η 按下式计算:

$$\eta = \frac{\Delta h}{H_f} \times 100\% \tag{2.3}$$

$$H_f = H_m - \Delta h \tag{2.4}$$

式中 Δh ——地表冻胀量, mm;
 H_f ——冻结深度, mm;
 H_m ——冻土层厚度, mm。

土的冻胀率与土的颗粒组成、孔隙度、含盐量、含水量关系密切。土在稳定负气温条件下, 土中含水量达到一定界限值时, 就表现出冻胀, 该界限值称为土的起始冻胀含水量。对细粒土, 起始冻胀含水量大致等于塑限含水量。

土层冻胀率可在现场用单层或分层冻胀仪做原始观测, 或由室内试验测定, 若有丰富经验时也可用经验公式计算确定。

7. 按冻土的融化下沉系数分类

在没有外荷载的作用条件下, 冻土在融化过程中, 由于土体中冰融化, 所产生的沉降称为融化下沉。融化下沉通常是不均匀的, 具有突陷性。融沉性可由试验测定, 常以平均融化下沉系数 δ_0 表示, 用下式计算。

$$\delta_0 = \frac{h_1 - h_2}{h_1} \times 100\% = \frac{e_1 - e_2}{1 + e_1} \times 100\% \tag{2.5}$$

式中 h_1 、 h_2 ——冻土试样融化前、后的高度, mm;

e_1 、 e_2 ——冻土试样融化前、后的孔隙比。

工程上依据平均融化下沉系数 δ_0 的大小,将多年冻土又可分为五级,具体分类情况见表 2.2。

- (1) $\delta_0 \leq 1\%$, I 级, 不融沉。
- (2) $1\% < \delta_0 \leq 3\%$, II 级, 弱融沉。
- (3) $3\% < \delta_0 \leq 10\%$, III 级, 融沉。
- (4) $10\% < \delta_0 \leq 25\%$, IV 级, 强融沉。
- (5) $\delta_0 > 25\%$, V 级, 融陷。

表 2.2 多年冻土按融沉性分类

土的名称	含水量 $\omega/\%$	平均融沉系数 δ_0	融沉等级	融沉类别
碎(卵)石、砾、粗、中砂 (0.075mm 粒径含量小于 15%)	$\omega < 10$	$\delta_0 \leq 1$	I	不融沉
	$\omega \geq 10$	$1 < \delta_0 \leq 3$	II	弱融沉
	$\omega < 12$	$\delta_0 \leq 1$	I	不融沉
	$22 \leq \omega < 15$	$1 < \delta_0 \leq 3$	II	弱融沉
	$15 \leq \omega < 25$	$3 < \delta_0 \leq 10$	III	融沉
	$\omega \geq 25$	$10 < \delta_0 \leq 25$	IV	强融沉
粉、细砂	$\omega < 14$	$\delta_0 \leq 1$	I	不融沉
	$14 \leq \omega < 18$	$1 < \delta_0 \leq 3$	II	弱融沉
	$18 \leq \omega < 28$	$3 < \delta_0 \leq 10$	III	融沉
	$\omega \geq 28$	$10 < \delta_0 \leq 25$	IV	强融沉
粉土	$\omega < 17$	$\delta_0 \leq 1$	I	不融沉
	$17 \leq \omega < 21$	$1 < \delta_0 \leq 3$	II	弱融沉
	$21 \leq \omega < 32$	$3 < \delta_0 \leq 10$	III	融沉
	$\omega \geq 32$	$10 < \delta_0 \leq 25$	IV	强融沉
黏性土	$\omega < \omega_p$	$\delta_0 \leq 1$	I	不融沉
	$\omega_p \leq \omega < \omega_p + 4$	$1 < \delta_0 \leq 3$	II	弱融沉
	$\omega_p + 4 \leq \omega < \omega_p + 15$	$3 < \delta_0 \leq 10$	III	融沉
	$\omega_p + 15 \leq \omega < \omega_p + 35$	$10 < \delta_0 \leq 25$	IV	强融沉
含土冰层	$\omega \geq \omega_p + 35$	$\delta_0 > 25$	V	融陷

注 1. 总含水量 ω , 包括冰和未冻水。

2. 盐渍化冻土、冻结泥岩化土、腐殖质、高塑性黏土不在表列。

当土的含水量小于起始融沉含水量时, $\delta_0 = 0$ 。对于大型建筑物, 要求尽可能在现场原位试验确定 δ_0 值, 但在一般工程地质评价及基础沉降验算中, 可依据冻结地基土的土质及物理力学性质按以下经验公式进行计算。

(1) 按含水量确定 δ_0 。

1) 按表 2.2 确定的融沉等级为 I、II、III、IV 类土, 按下式计算 δ_0 。

$$\delta_0 = \alpha_1 (\omega - \omega_0) \times 100\% \quad (2.6)$$

2.1 冻土及其分类

式中 α_1 ——修正系数，按表 2.3 确定；

ω_0 ——冻土起始融沉含水量，%，可按表 2.3 确定。

对于黏性土，冻土起始融沉含水量可按下式计算：

$$\omega_0 = 5 + 0.8\omega_p \quad (2.7)$$

式中 ω_p ——土体的塑限含水量，%。

表 2.3 α_1 、 ω_0 值表

土质	砾石、碎石土	砂类土	粉土、粉质黏土	黏土
α_1	0.5	0.6	0.7	0.6
ω_0	11.0	14.0	18.0	23.0

注 1. 对于粉黏土（粒径小于 0.074mm）含量小于 15% 的土， α_1 取 0.4。

2. 黏性土起始融沉含水量 ω_0 按式 (2.7) 计算的值与表 2.3 所列数值不同时取小值。

2) 按表 2.2 确定的融沉等级为 V 类土，按下式计算 δ_0 。

$$\delta_0 = 3 \sqrt{\omega - \omega_c} + \delta'_0 \quad (2.8)$$

$$\omega_c = \omega_p + 35 \quad (2.9)$$

对于粗颗粒土可用 ω_0 代替 ω_p 。缺乏试验资料时， ω_c 可按表 2.4 取值。 δ'_0 对应于 $\omega = \omega_c$ 值，可按式 (2.6) 计算。缺乏试验资料时，可按表 2.4 取值。

表 2.4 ω_c 、 δ'_0 值

土质	砾石、碎石土	砂类土	粉土、粉质黏土	黏土
$\omega_c / \%$	46	49	52	58
$\delta'_0 / \%$	18	20	25	20.0

注 对于粉黏土（粒径小于 0.074mm）含量小于 15% 的土， ω_c 取 44%， δ'_0 取 14%。

(2) 按土体干密度 ρ_d 确定 δ_0 。

1) 按表 2.2 确定的融沉等级为 I、II、III、IV 类土，按下式计算 δ_0 。

$$\delta_0 = \alpha_2 \frac{\rho_{d0} - \rho_d}{\rho_d} \quad (2.10)$$

式中 α_2 ——修正系数，按表 2.5 确定；

ρ_{d0} ——冻土起始融沉干密度， t/m^3 ，可按表 2.5 取值。

表 2.5 α_2 、 ρ_{d0} 值

土质	砾石、碎石土	砂类土	粉土、粉质黏土	黏土
α_2	25	30	40	30
$\rho_{d0} / (t/m^3)$	1.95	1.80	1.70	1.65

注 对于粉黏土（粒径小于 0.074mm）含量小于 15% 的土， α_2 取 20， ρ_{d0} 取 2.0 t/m^3 。

2) 按表 2.2 确定的融沉等级为 V 类土，按下式计算 δ_0 。

$$\delta_0 = 60(\rho_{dc} - \rho_d) + \delta'_0 \quad (2.11)$$

式中 ρ_{dc} ——对应于 $\omega = \omega_c$ 时冻土的干密度，无试验资料时，可查表 2.6；

其他符号意义同前。

表 2.6

ρ_{dc} 值

土质	砾石、碎石土	砂类土	粉土、粉质黏土	黏土
$\rho_{dc}/(\text{t/m}^3)$	1.16	1.10	1.05	1.00

注 对于粉黏土（粒径小于 0.074mm）含量小于 15% 的土， α_2 取 20， ρ_{dc} 取 1.2t/m³。

8. 按冻结特征分类

少冰冻土、多冰冻土、富冰冻土和饱冰冻土。

多年冻土按冻结特征的分级与土的颗粒和冻土总含水量 ω_n 界限的关系及其融陷性等级见表 2.7。

表 2.7

多年冻土与土的颗粒和总含水量界限的关系及其融陷性分级

多年冻土名称	土的类别	总含水量 $\omega_n/\%$	融化后的潮湿状态	融陷等级及评价
少冰冻土	粉黏粒质量不大于 15%（或粒径小于 0.1mm 的颗粒不大于 25%，以下同）的粗颗粒土（包括碎石土、砂砾、粗砂、中砂，以下同）	$\omega_n \leq 0$	潮湿	Ⅰ级不融陷
	粉黏粒质量大于 15%（或粒径小于 0.1mm 的颗粒大于 25%，以下同）的粗颗粒土、细砂、粉砂	$\omega_n \leq 12$	稍湿	
	黏性土、粉土	$\omega_n \leq \omega_p$	半干硬	
多冰冻土	粉黏粒质量不大于 15% 的粗颗粒土	$10 < \omega_n \leq 16$	饱和	Ⅱ级弱融陷
	粉黏粒质量大于 15% 的粗颗粒土、细砂、粉砂	$12 < \omega_n \leq 18$	潮湿	
	黏性土、粉土	$\omega_p < \omega_n \leq \omega_p + 7$	硬塑	
富冰冻土	粉黏粒质量不大于 15% 的粗颗粒土	$16 < \omega_n \leq 25$	饱和出水（出水量小于 10%）	级中融陷
	粉黏粒质量大于 15% 的粗颗粒土、细砂、粉砂	$18 < \omega_n \leq 25$	饱和	
	黏性土、粉土	$\omega_p + 7 < \omega_n \leq \omega_p + 15$	软塑	
饱冰冻土	粉黏粒质量不大于 15% 的粗颗粒土	$25 < \omega_n \leq 44$	饱和大量出水（出水量 10%~20%）	Ⅳ级强融陷
	粉黏粒质量大于 15% 的粗颗粒土、细砂、粉砂		饱和大量出水（出水量小于 10%）	
	黏性土、粉土	$\omega_p + 15 < \omega_n \leq \omega_p + 35$	软塑	
含土冰层	碎石土、砂土	$\omega_n > 44$	饱和大量出水（出水量 10%~20%）	Ⅴ级极融陷
	黏性土、粉土	$\omega_n > \omega_p + 35$	软塑	

注 1. ω_p 为塑限含水率，%。
2. 碎石土及砂土的总含水量界限为该两类土的中间值。含粉黏粒少的粗颗粒土比表列数值小；细砂、粉砂比表列数值大。
3. 黏性土、粉土总含水量界限中+7、+15、+35 为不同类别黏性土的中间值。粉土比该值小；黏性土比该值大。