



全国高等院校水利水电类精品规划教材

水工建筑物冻害 防治技术

谭志伟 杨 革 主编
张儒生 主审



黄河水利出版社

参考文献

全国高等院校水利水电类精品规划教材

水工建筑物冻害防治技术

主 编 谭志伟 杨 革

主 审 张儒生

黄河水利出版社

内 容 提 要

本书为全国高等院校水利水电类精品规划教材,是水利类各专业的教学用书。全书共分 11 章,包括:绪论,冻土概论,水工建筑物冰冻害破坏机理及其原因,水工建筑物抗冰冻设计,渠道衬砌冻害防治技术,以桩、柱、墩为基础的桥、渡槽等建筑物冻害防治技术,以板形为基础的闸、涵、陡坡等建筑物冻害防治技术,水工挡土墙冻害防治技术,堤坝和混凝土建筑物的冰害和冻融破坏防治技术,冻土地区水工建筑物管理,水工建筑物抗冻结构型式。本书注重理论与实际的结合及应用,力求提高水工抗冻设计的综合能力。

本书除可作为水利类各专业本科生的教材外,也可作为相关专业师生的教学参考书和有关工程技术人员的参考书。

图书在版编目(CIP)数据

水工建筑物冻害防治技术/谭志伟,杨革主编. —郑州:
黄河水利出版社,2008.4

全国高等院校水利水电类精品规划教材

ISBN 978-7-80734-358-5

I. 水… II. ①谭… ②杨… III. 水工建筑物-防冻-
高等学校-教材 IV. TV698.2

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2008)第 033908 号

策划组稿:马广州 电话:13849108008 E-mail:magz@yahoo.cn

出版社:黄河水利出版社

地址:河南省郑州市金水路 11 号 邮政编码:450003

发行单位:黄河水利出版社

发行部电话:0371-66026940,66020550,66028024,66022620(传真)

E-mail:hhslebs@126.com

承印单位:黄河水利委员会印刷厂

开本:787 mm × 1 092 mm 1/16

印张:14.75

字数:340 千字

版次:2008 年 4 月第 1 版

印数:1—4 100

印次:2008 年 4 月第 1 次印刷

定价:28.00 元

全国高等院校水利水电类精品规划教材

编 审 委 员 会

主 任:刘德富 刘汉东

副主任:黄 强 吴泽宁 文 俊 左战军

委 员:(以姓氏笔画为序)

丁光彬 于雪涛 尹志刚 王海军

田 斌 刘成林 刘廷玺 刘福胜

许光祥 孙明权 迟道才 张 丽

张京穗 辛全才 杨国范 杨路华

陈春柏 侍克斌 姚李孝 程吉林

赖喜德 樊鸣放

前 言

我国“三北”地区即东北、华北、西北地区,除部分地区处于多年冻土区外,大部分为季节性冻土区。这些地区土质表层都存在一层冬冻春融的冻结——融化层,由于该冻土地区冻土具有特殊的物理力学特性,在此地基上修建的建筑物强度、变形、稳定性都受到很大的影响,遭到严重的破坏。尤其水利工程中的建筑物冻害破坏最为严重,多数建筑物由于冻害破坏已更换了两三次,影响了工程效益的发挥,耗费了大量资金,给水利事业带来了危害。由此可见,研究与掌握冻土的特性和建筑物的冻害特点,破坏的机理、原因及有效的防治措施是十分重要的。

近 30 年来,我国的水利科技工作者做了许多有效的理论和试验研究及调查工作,为生产实践提供了许多宝贵的理论基础和有效措施,取得了多项科研成果。由水利部颁布的《渠系抗冻胀设计规范》(SL23—91,新修订的 SL23—2006)和《水工建筑物抗冰冻设计规范》(SL211—98,新修订的 SL211—2006),就是多年来科研成果的总结。

本书根据水利类专业本科教学的要求和实际水利工程设计的需要而编写。遵循教学改革的精神,打好基础,拓宽知识,密切联系实际,重视实践能力,培养学生的分析、创新、应用能力,针对我国季节性冻土区的特点,目前还缺乏较系统的水工建筑物抗冻害方面的本科教材,为此编写了《水工建筑物冻害防治技术》教材。

本书主要包括绪论,冻土概论,水工建筑物冰冻害破坏机理及其原因,水工建筑物冰冻设计,渠道衬砌冻害防治技术,以桩、柱、墩为基础的桥、渡槽等建筑物冻害防治技术,以板形为基础的闸、涵、陡坡等建筑物冻害防治技术,水工挡土墙冻害防治技术,堤坝和混凝土建筑物的冰害和冻融破坏防治技术,冻土地区水工建筑物管理,水工建筑物抗冻结构型式等内容。它可作为水利类各专业本、专科的教材,也可作为从事水利工作的科技人员的参考书。编写中依据两个抗冻设计规范,并参考了多年来有关的文献资料 and 研究成果,结合编者的工作、学习、研究、总结编写了本教材。力求贯彻密切联系工程实际,引入新成果、新技术、新规范,试求按人们认识的规律和工程设计的要求,在阐明基本理论和概念基础上做到设计思路清晰、分析明确、简明扼要、突出实用;为帮助学生理解和应用,并附有实例,便于掌握基本理论、基本概念和应用。

本书由黑龙江大学谭志伟、杨革任主编,黑龙江省农垦林业职业技术学校孙家国、黑龙江省农垦总局张国辉任副主编,参编有刘洪林(沈阳农业大学)、刘莹(黑龙江大学)、何艳秋(黑龙江省农垦勘测设计研究院)、边延辉(黑龙江省水利勘测设计研究院)。具体分工如下:谭志伟(第二章第二节、第三节,第三章第二节、第三节、第四节,第九章第二节,第十一章第二节)、杨革(第二章第一节,第九章第一节)、孙家国(第三章第一节)、张国辉(第六章)、刘洪林(第七章,第十一章第一节)、刘莹(第五章,第八章)、何艳秋(第十章,并负责全书的大部分绘图工作)、边延辉(第一章,第四章)。

本书由黑龙江大学张儒生任主审,在编审过程中对书稿提出了许多建设性和具体的

修改意见。本书在编写过程中得到黑龙江大学教务处、水利电力学院领导的大力支持,还得到黑龙江大学姜宝林教授所提供的宝贵资料和指导,在书中参考和引用了一些单位和个人文献资料,在此一并表示衷心的感谢。

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

本书在编写过程中得到黑龙江大学教务处、水利电力学院领导的大力支持,还得到黑龙江大学姜宝林教授所提供的宝贵资料和指导,在书中参考和引用了一些单位和个人文献资料,在此一并表示衷心的感谢。

编 者

2007年11月

本书在编写过程中得到黑龙江大学教务处、水利电力学院领导的大力支持,还得到黑龙江大学姜宝林教授所提供的宝贵资料和指导,在书中参考和引用了一些单位和个人文献资料,在此一并表示衷心的感谢。

本书在编写过程中得到黑龙江大学教务处、水利电力学院领导的大力支持,还得到黑龙江大学姜宝林教授所提供的宝贵资料和指导,在书中参考和引用了一些单位和个人文献资料,在此一并表示衷心的感谢。

本书在编写过程中得到黑龙江大学教务处、水利电力学院领导的大力支持,还得到黑龙江大学姜宝林教授所提供的宝贵资料和指导,在书中参考和引用了一些单位和个人文献资料,在此一并表示衷心的感谢。

本书在编写过程中得到黑龙江大学教务处、水利电力学院领导的大力支持,还得到黑龙江大学姜宝林教授所提供的宝贵资料和指导,在书中参考和引用了一些单位和个人文献资料,在此一并表示衷心的感谢。

本书在编写过程中得到黑龙江大学教务处、水利电力学院领导的大力支持,还得到黑龙江大学姜宝林教授所提供的宝贵资料和指导,在书中参考和引用了一些单位和个人文献资料,在此一并表示衷心的感谢。

目 录

前言	(1)
第一章 绪 论	(1)
第一节 我国冻土地区工程冻害破坏特点	(1)
第二节 我国工程抗冻技术的研究	(3)
第二章 冻土概论	(5)
第一节 冻土概述	(5)
第二节 土的冻胀	(24)
第三节 土的冻胀性及地基土冻胀级别分类	(32)
第三章 水工建筑物冰冻害破坏机理及其原因	(37)
第一节 土的冻胀力	(37)
第二节 冰对水工建筑物的作用	(54)
第三节 冻融对水工建筑物的作用	(62)
第四节 水工建筑物冻害破坏原因	(66)
第四章 水工建筑物抗冰冻设计	(69)
第一节 水工建筑物抗冰冻设计的内容及原则	(69)
第二节 水工建筑物抗冰冻计算依据及内容	(72)
第五章 渠道衬砌冻害防治技术	(75)
第一节 渠道冻害破坏规律	(75)
第二节 渠道衬砌抗冻计算	(79)
第三节 渠道冻害防治措施	(82)
第六章 以桩、柱、墩为基础的桥、渡槽等建筑物冻害防治技术	(96)
第一节 以桩、柱、墩为基础的桥、渡槽等建筑物冻害破坏规律	(96)
第二节 以桩、柱、墩为基础的桥、渡槽等建筑物抗冻计算	(101)
第三节 以桩、柱、墩为基础的桥、渡槽等建筑物冻害防治措施	(109)
第七章 以板形为基础的闸、涵、陡坡等建筑物冻害防治技术	(115)
第一节 以板形为基础的闸、涵、陡坡等建筑物冻害破坏规律	(115)
第二节 以板形为基础的闸、涵、陡坡等建筑物抗冻计算	(118)
第三节 以板形为基础的闸、涵、陡坡等建筑物冻害防治措施	(122)
第八章 水工挡土墙冻害防治技术	(131)
第一节 水工挡土墙冻害破坏规律	(131)
第二节 水工挡土墙抗冻计算	(133)
第三节 水工挡土墙冻害防治措施	(141)

第九章 堤坝和混凝土建筑物的冰害和冻融破坏防治技术	(147)
第一节 水工建筑物冰冻害防治技术	(147)
第二节 水工建筑物冻融破坏防治技术	(174)
第十章 冻土地区水工建筑物管理	(183)
第一节 冻土地区水工建筑物检查观测	(183)
第二节 冻土地区水工建筑物养护修理	(188)
第十一章 水工建筑物抗冻结构型式	(194)
(1) 第一节 一字闸	(194)
(2) 第二节 竖井式跌水	(215)
参考文献	(227)
(2)	生排土水 首一章
(34)	北水排土 首二章
(35)	类代限排土基排土水排土 首三章
(37)	因限其基排土基排土水排土 首三章
(37)	北水排土 首一章
(42)	排土水排土 首二章
(52)	排土水排土 首三章
(66)	因限其基排土基排土水排土 首四章
(69)	排土水排土 首四章
(69)	排土水排土 首一章
(73)	排土水排土 首二章
(75)	排土水排土 首五章
(75)	排土水排土 首一章
(79)	排土水排土 首二章
(85)	排土水排土 首三章
(96)	排土水排土 首六章
(96)	排土水排土 首一章
(101)	排土水排土 首二章
(109)	排土水排土 首三章
(112)	排土水排土 首十章
(112)	排土水排土 首一章
(118)	排土水排土 首二章
(123)	排土水排土 首三章
(131)	排土水排土 首八章
(131)	排土水排土 首一章
(133)	排土水排土 首二章
(141)	排土水排土 首三章

第一章 绪 论

我国是冻土较多的国家,为第三冻土大国。冻土面积占国土面积的 70% 以上,其中季节性冻土占 50% 以上。在这些地区冬季气候寒冷,最冷月平均气温在 -3°C 以下,冬季地表土层冻结,水面结冰,春季转暖融化。在这广大的冻土区进行工程建设,修建各类工程建筑物,必然遭到冻土和冰盖所带给建筑物的冻害破坏,影响工程建设。因此,必须研究建筑物的冻害破坏问题,采取有效的措施防治建筑物的冻害破坏。

地基土的冻结和融化及河(渠)、湖水的冻结和融化产生了一系列的物理力学性质的变化,造成地基土的冻胀、融解沉陷,冰的体积膨胀、流冰等;产生了冻胀力、冰压力。在这些因素的作用下使建筑物的结构发生破坏统称为冰冻害,一般可称为冻害。对于由于地基土冻胀造成建筑物的结构破坏称为冻胀破坏。对于由冰对水工建筑物作用造成建筑物结构的破坏,称为冰害。

第一节 我国冻土地区工程冻害破坏特点

一、水利工程冻害破坏特点

我国修建了数以万计的水利工程分布在季节性冻土区,在这些地区修建的各类水工建筑物,以往按常规的暖土地基设计方法进行设计和施工。在 20 世纪 90 年代以前,无抗冻设计规范可循,致使许多工程受到冻胀、冻胀力、冻融和冰压力的作用,使多数水工建筑物遭到冻害破坏,影响了正常运用。

(一)渠系工程

渠系工程中闸、涵、桥、渡槽、跌水、陡坡、渠道、倒虹吸等建筑物,因受冻胀、冻融、冰压力和冻胀力作用,冻害破坏最为严重,20 世纪 80 年代据各省的调查结果均占到 50% ~ 80%,有的已经重建几轮,甚至有的要年年维修。其破坏特征主要表现在以下几方面:

(1) 裂缝与断裂。建筑物出现裂缝现象相当普遍,裂缝可有规则裂缝、不规则裂缝;形状可有斜裂缝、水平裂缝和垂直裂缝。水平裂缝由于断面强度不够常常断裂。

(2) 融沉与倾覆。冬冻春融,融化地基含水量增加,压缩性大,在建筑物荷载作用下沉陷,沉陷量不均匀,沉陷过大造成建筑物的分缝止水断裂,形成渗水通道,产生渗流破坏。由于不均匀沉陷和在水平荷载作用下又造成建筑物的倾斜,有的可达 10 ~ 20 cm,严重的建筑物倾覆破坏。

(3) 隆起上抬与冻拔和拔断。冻胀作用使得建筑物在法向冻胀力和切向冻胀力作用下,整体隆起上抬,对于桩柱基础,可被拔起,当断面强度不够时可能被拔断。

(4) 洞身隆起下沉、管身错位脱节。涵洞进出口洞身在冻胀力作用下隆起上抬,融化时又下沉,造成管节间接缝处错开、脱离,止水破坏。若管身分缝过长可能造成裂缝或

折断。

(5)渠道衬砌裂缝鼓胀、隆起架空、整体上抬、滑塌。渠道衬砌较轻,在土的冻胀作用下,衬砌鼓起,土的不均匀冻胀致使衬砌产生裂缝或在分缝处开裂。衬砌的鼓起使衬砌相互间搭接、架空,对于整体的U形槽又可发生整体上抬,在土融化时,又致使衬砌下滑塌落。

(二) 水利水电枢纽工程

水利水电枢纽工程中的闸、坝、溢洪道、隧洞及水电站建筑物,土的冻胀、冻胀力和冰压力的作用常致使土石坝护坡鼓起、冰推隆起上移、搭架、断裂、冰拔等破坏,溢洪道底板衬砌冻胀隆起、裂缝等破坏,输水建筑物首部,进水口的墩、柱、墙倾斜、裂缝、剪断等破坏。流冰时,在冰凌的作用下冰块堵塞输水道和电站进水口,冰屑进入输水管道减小流量,影响机组发电和输水,有的甚至形成冰坝,壅高水位,发生冰坝洪水,威胁建筑物的安全。水工闸门在静冰压力和动冰压力作用下,产生闸门上抬、闸门变形、闸门无法开启、启闭设施损坏等,影响闸门的正常运用。在多次冻融和冻胀作用下,水工混凝土和浆砌石结构遭到破坏,结构表面产生裂缝、剥落、疏松、露石、露筋等现象,影响了建筑物的正常运用。

二、其他工程冻害破坏特点

(一) 房屋建筑工程方面

房屋建筑基础由于地基土冻胀、不均匀冻胀和融沉引起房屋建筑产生裂缝、倾斜和弯曲变形。特别是对低层平房建筑冻害最大。裂缝的形式主要为对称的八字形裂缝、局部的斜裂缝、水平裂缝及垂直裂缝。对称的八字形裂缝常发生在房屋的四角,呈对称八字形斜裂缝。它由于房屋基础埋深四角受到对称的冷空气入侵,冻胀条件相同,其他部分冻胀条件弱,四角冻胀量比其他部位大,在不均匀冻胀条件下,墙体在受弯拉应力作用下,在薄弱部位产生裂缝。因此,常看到在门窗附近和房屋角处出现对称的斜裂缝。局部的斜裂缝和垂直裂缝及水平裂缝是由于冻胀条件不同,在一端冻胀强、冻胀力大的作用下,基础不均匀上抬,则在房屋薄弱处和连接处产生斜裂缝和垂直裂缝及水平裂缝。倾覆和弯曲变形也是在土质冻胀条件、水分条件不同的情况下,基础产生不均匀冻胀,尤其是南北向房屋和围墙,常呈现向南倾斜和弯曲的现象。

(二) 道路工程方面

铁路、公路路基因冻胀常引起路基变形,不均匀冻胀产生路基不平,路面产生裂缝,一般多呈纵向分布,严重时造成路面破碎;路桥墩柱冻拔上抬、桥面隆起,桥台、翼墙裂缝倾覆倒塌,更为严重的是,在春季融化时,含水量增大,路基中水分不能及时排出,形成潮湿软弱状态,承载力下降,通过车辆时造成路面鼓包、翻浆冒泥、龟裂、车辙,影响行车,中断交通。对于季节性冻土区的地下管道、路旁输水管道,埋深小于冻深时,常由于土的冻胀作用而破坏,主要是不均匀冻胀和竖向冻胀力、切向冻胀力作用使管道产生弯曲应力,从而使管道产生弯曲,当管道材料强度不够时而断裂漏水,或因管道内水结冰堵塞影响输水,当气温回升时,冰体积膨胀,产生静冰压力,致使管道开裂。

第二节 我国工程抗冻技术的研究

一、建筑工程抗冻技术研究的意义

我国建筑工程大部分都修在冬冻春融的季节性冻土的地基上,由此造成了大多数建筑工程的不同程度的冻害破坏,涉及的地区和行业很广泛。房屋建筑工程、铁路、公路、交通工程、水利工程、市政工程等,每年因冻害产生建筑物变形等破坏不能正常运用而投入了大量的资金维修。特别是水利工程上的建筑物,由于它处于易冻胀的特殊自然环境条件下,冻害破坏更加严重,投入的维修、养护、改建的资金就更加巨大,每项工程都得数十万元至数百万元以上,不但如此,还影响了灌溉、发电、供水、航运、防洪等效益的发挥。

因此,研究抗冻技术,揭示建筑物冻害破坏原因机理,掌握建筑物地基的冻土物理学特性及对建筑物作用的机理,提出冻害防治的措施,无疑意义是重大的。它可以使人们从冻害破坏原因机理出发,在生产实践中提出防治冻害的措施,增加建筑物的使用年限,发挥建筑物的作用,节约大量资金用于新的建设项目,增加经济效益和社会效益,对水资源可持续发展、改善环境、国民经济的持续发展具有很大意义。

二、水利工程抗冻技术研究的概况

水工建筑物冻害防治研究的基础是冻土学。世界上研究冻土的国家主要为前苏联、美国、加拿大、瑞典、日本、挪威和中国。前苏联的研究处于世界的前列,取得一批科研成果,发表了一批专著,如 M·U·苏姆金的《普通冻土学》,H·A·崔托维奇的《冻土力学》、《冻土的地基与基础》,马祖罗夫的《冻土的物理力学性质》等。

我国冻土研究起步较晚,新中国成立初期主要为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研究冻土的工作。水利工程中的冻土冻害防治研究工作也是从 20 世纪 50 年代开始的,主要对负气温下土方施工、冬季土坝防渗铺盖问题结合实际工程进行了研究,为寒冷地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,成立了全国的抗冻技术联合组织、抗冻技术科学研究协作组和抗冻技术情报网,多次参加了国际冻土学术会议,召开了多次全国的冰川冻土会议。中国科学院冰川冻土研究所、水利部东北勘测设计院、黑龙江水利科学研究所、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、生产单位紧密结合生产实践,进行了大量的调查和室内外试验,从理论和实践上取得了一大批科研成果,在冻土物理力学、物理化学性质,土的冻胀分类、冻胀预报、冻害机理、冻害防治、抗冻计算等方面发表了一批论文,在水利、交通、工业民用等建筑行业相应颁布了有关冻土工程的规范,如《水工建筑物抗冰冻设计规范》(SL211—98,SL211—2006)、《渠系工程抗冻胀设计规范》(SL23—91,SL23—2006)、《冻土地区建筑地基基础设计规范》(JGJ118—98)、《公路桥涵地基与基础设计规范》(JTJ024—85)、《建筑桩基技术规范》(JGJ94—94)等,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)、《水工建筑物冻害及其防治》(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)等一批著作,在抗冻技术研究方面获得了一批省、部级的科学技术成果奖。这些成果对建筑物的冻害防治起了很好的作用。关于冻土和冻害防治的研究还远没有结束,许多基础理论和生产实践问题需进一步的研究、完善,任重而道远。随着我国经济的发展、国力的增强,我国冻土的研究必将取得更大的成就。

三、本教材的主要内容

我国季节性冻土区三北地区水工建筑物,在冬季运用过程中受到冰、土的冻胀及冻融作用,使得许多工程建筑物遭到不同程度的破坏,主要表现在以下几个方面:

(1)建筑物如闸、涵、桥、渡槽、挡土墙、土堤、渠等在冻胀和冻胀力作用下产生上拔、倾覆、裂缝、断裂等造成变形失稳和强度的破坏。

(2)冻融使水工混凝土和浆砌石结构建筑物及土质建筑物堤坝渠等产生剥蚀、裂缝、倾覆、融沉、塌滑等造成建筑物变形失稳和强度的破坏。

(3)冰层的膨胀和流冰产生的冰压力对建筑物的推力、撞击力造成建筑物的裂缝、隆起、推移、倾斜等变形失稳破坏和强度破坏。流冰造成渠道、引水建筑物等堵塞,影响建筑物的正常运行。结冰和流冰对水工闸门、拦污栅等金属结构的作用造成推移、上抬、堵塞等影响金属结构正常工作。

为防治上述这些冰冻作用对建筑物的危害或对正常运行不利的影响,针对以上冰冻害问题,从各类水工建筑物冻害破坏特征入手,分析建筑物产生冻害破坏的原因机理,提出防治冻害的抗冻设计的方法和抗冻措施及冻土区水工建筑物的管理养护问题。本教材的主要内容包括:

绪论简要讲述冻土区工程建筑物的冻害破坏特点和工程抗冻技术研究的意义和概况。

第二、三章从揭示水工建筑物冻害破坏原因入手,讲述了工程冻土的基本概况、冻土的物理力学性质、土的冻胀机理和土的冻胀性分类,阐述了造成水工建筑物冻害破坏的冻胀及冻胀力、冰、冻融三大因素的作用机理。

第四章讲述了水工建筑物的抗冰冻设计的内容、方法与步骤。

第五、六、七、八章阐述了渠系工程中渠道、闸、涵、桥、渡槽、挡土墙等建筑物冻害防治技术。全面论述了上述各类建筑物的抗冻设计要求。

第九章论述了堤坝和混凝土建筑物冰害和冻融破坏的防治技术。

第十章论述了冻土地区水工建筑物检查观测与养护维修等方面的管理养护问题。

第十一章介绍了生产实践中具有抗冻能力的新型的水工建筑物结构型式,论述了竖井式跌水和一字闸的抗冻结构特点及设计方法和要求。

第二章 冻土概论

第一节 冻土概述

一、冻土

(一) 冻土的概念及分类

含有水的土体,当温度降低到冻结温度 0°C 或 0°C 以下时,土中的孔隙水便会冻结成冰,这种现象称为土的冻结。冰体的产生,胶结了土的颗粒,各种土体的冰析作用,使得原来松散状态的介质,表现出了非常复杂的物理化学力学性质,其原来的物理力学特性有了很大变化。为此,把这种具有负温度及冰,并且胶结着松散固体颗粒的土称为冻土。显然,负温度及冰胶结的土是冻土的重要特征。对于那些虽然具有负温度但不存在冰胶结的土称为“寒土”;温度高于土中水的冻结温度的土称为“未冻土”或“暖土”;经常受冻结后融化的土称为“冻融土”。

根据冻土存在时间的长短,通常将冻土划分为如下几种:

(1) 多年冻土(永久冻土)。土的冻结状态存在数年,甚至数百年以上的冻土为多年冻土,这样的地区称为多年冻土区。

多年冻土地区的表层土,夏季也将融化一定深度,冬季又重新冻结。这一层土融化和冻结的深度随温度的年季节变化而有所不同。在衔接多年冻土情况下,这一土层可称为“季节融化层”(见图 2-1(a)),而在非衔接多年冻土情况下则称这一土层为“季节冻结层”(见图 2-1(b))。

(2) 季节冻土。土的冻结状态呈周期性的年季节变化,每年冬季冻结一定深度,夏季又全部融化,这一土层称为“季节冻结层”,其下部为常年处于正温的暖土层,对于这种地区称为季节冻土区。这种冻土称为季节冻土(见图 2-1(c))。

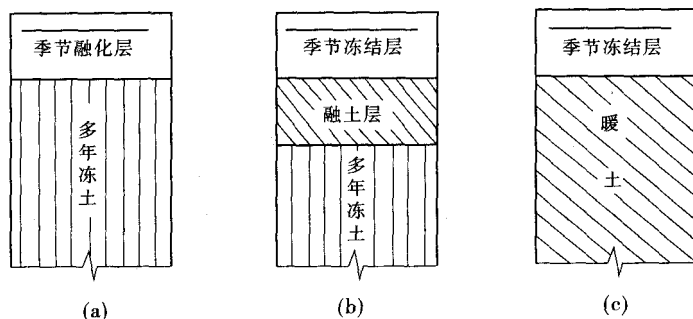


图 2-1 冻土分类图

(3)暂时冻土。土的冻结状态只存在几小时或几天的短时间内,这样的土为暂时冻土。它只产生在地表很薄的土层中。

根据变形特性又可分为坚硬冻土、塑性冻土与松散冻土。

(1)坚硬冻土。在负温度较低时土中的水分大部分结冰,矿物颗粒牢固地被冰所胶结,比较坚硬,强度较高,压缩性小,此类土为坚硬土,压缩系数不大于 0.01 MPa^{-1} ,又称为低温冻土。

(2)塑性冻土。负温度较高(土温接近 0°C 或土中的水分绝大部分尚未相变的温度),土的颗粒难以被冰所胶结,但具有黏滞性,有较多的未冻水存在,在外荷载作用下有较大的压缩性,有较明显的塑性,此类土为塑性冻土,压缩系数大于 0.01 MPa^{-1} ,又称为高温冻土。

(3)松散冻土。土中含水量较少,粗颗粒土持水性差,当含水量低到一定程度时,所冻结的冰没有把粗颗粒土胶结而形成松散状态,此类土为松散冻土,它的物理性质仍与非冻土相同。

对工程建筑来说,多年冻土和季节冻土都具有重要影响。而暂时冻土由于只发生在地表很薄的土层中且存在时间又短,故不起作用,影响不大。我国冻土区,包括多年冻土区和季节冻土区占全国总面积的 $2/3$ 以上,达 76.3% 。多年冻土区主要分布在东北大兴安岭、青藏高原及西部高山等地,占全国领土面积的 22.3% 。季节冻土区分布于长江流域以北的十余个省份,占全国总面积的 54% ,季节冻土层厚度变化趋势从北向南逐渐减薄。黑龙江北部冻深最大可达 $2\sim 3 \text{ m}$,长江以北与黄河以南地区冻深一般小于 0.5 m ,黄河以北地区冻深一般大于 0.5 m 。这些地区的工程建筑都存在不同程度的冻害,因此研究冻土就显得十分重要。

(二)冻土构造

冻土是一个复杂的多相、多成分的复合体,由固体(矿物骨架)、塑性黏滞体(冰)、液体(未冻水)和气体(水蒸气)所组成的复杂体系。

根据冻土中冰体的形状、尺寸和分布,冻土的构造有以下几种类型:

(1)整体状构造。在没有外水地下水向冻结层补给时,或外界冻结强度大、冻结速率大、外界水来不及水分迁移时就已冻结,冰体来不及析出,肉眼很难见到冰体,冻土构造呈整体状,一般粗粒土常形成此构造。整体状构造具有较高的强度,水分重分布不明显,冻胀量较小,融化时强度降低也较小,与冻前比较物理力学性质变化不大。

(2)层状构造。在有外水地下水补给和高含水量单向冻结的条件下生成,主要是黏性土,在含水量高、单向冻结速率小、水分迁移充分,相变时放出的潜热使冻结锋面在某一位置停留时间较长,在这种条件下,产生冰析形成冰层,为层状构造。它冻胀性较大,融化时温度急剧下降,物理力学性质有很大改变,产生明显的沉陷,承载力大大降低。

(3)网状构造。在外水补给充分和含水量丰富的多向冻结条件下生成,也多产生在细粒土中。表现为不同形状的冰体,形成大小不同、不连续的网或框格的网状构造。也有的由于土质不均匀冻结时,除形成冰透镜体外,还产生大量的纵横交错的冰脉,也可形成网状构造。它的冻胀性和融沉性在层状构造与整体状构造冻土之间。

(4)冰包裹状构造。多发生在砾石土中,在处于饱水状态并长期冻结条件下生成。

表现为在砾石周围形成冰包裹体,不同厚度的冰壳部分或全部包裹粗碎石,使碎石颗粒彼此分开,在较细的卵石上,由纯冰或冰与亚黏土的混合物组成的硬壳包在表面上。此构造冻土只有一般冻胀性,融化时也有较大的沉陷性。

(三) 冻土的基本物理特性指标

冻土的物理特性指标也需要在气温为负温条件下,由实验室专门的试验仪器来测定,主要有以下四种特性指标:

(1) 冻土的质量密度(容重)。是表示冻土天然压实度的重要指标。它是指单位体积冻土的质量,可表示为:

$$\rho = \frac{M}{V} \quad (2-1)$$

式中 ρ ——冻土的密度, g/cm^3 ;

M ——冻土的质量, g ;

V ——冻土的体积, cm^3 。

(2) 冻土含水量。是指冻土中所含冰的质量和未冻水质量之和与土骨架质量之比,用百分数或小数表示。含水量的大小直接影响着土的冻胀性,含水量 w 用下式表示:

$$w = \frac{M_w}{M_s} \quad (2-2)$$

式中 M_w ——冻土中总含水质量, g ;

M_s ——干土质量, g 。

(3) 冻土含冰量。工程上常用相对含冰量 i_0 作为指标,它是指土中含冰的质量与土中全部水的质量之比,用百分数或小数表示,即:

$$i_0 = \frac{M_0}{M_w} = \frac{M_0 - M_\mu}{M_w} \quad (2-3)$$

式中 M_0 ——土中含冰的质量, g ;

M_w ——冻土中总含水质量, g , $M_w = M_0 + M_\mu$;

M_μ ——冻土中未冻水质量, g 。

(4) 冻土中未冻水含量。冻土中的液体水为未冻水,始终保持着不冻结状态的水。冻土中未冻水含量 w_μ 是指冻土中未冻水的质量与土骨架质量之比,用百分数表示,即:

$$w_\mu = \frac{M_\mu}{M_s} \quad (2-4)$$

冻土中的含冰量和未冻水量不是固定不变的,它是随着外界的条件变化而变化的,但始终保持着它们之间的动态的平衡。

二、土的冻结

(一) 土的冻结特点

土的冻结主要是表现在负温作用下,土中水分冻结成冰。土颗粒间由水分联结变成了冰晶胶结,土由原来的松散体变为固体。可见,土中的水和土冻结过程中温度变化是土的冻结过程的主要特征。

1. 土冻结过程中温度特征

土中孔隙水出现结晶,标志着土开始冻结,通常情况下,土中的水一般不在 $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ 开始冻结,往往出现过冷现象。即在环境负温作用下,土的温度由正温降至零下,虽然负温值超过了土中水的冻结温度,但并未发生相态变化。达到的最低温度称为过冷温度。当土中一旦开始结晶,土温突然升高到某一稳定温度时,此时土开始冻结,此时的稳定温度为起始冻结温度。无论是黏土或砂土,其冻结温度都低于 $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。塑性黏土冻结温度在 $-0.1\sim-1.2\text{ }^{\circ}\text{C}$ 之间;坚硬、半坚硬黏土冻结温度在 $-2\sim-5\text{ }^{\circ}\text{C}$ 之间;砂在 $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时冻结。土在冻前有个“过冷”阶段。这说明土在低于冻结温度的负温环境中仍可维持一定时间不至于冻结。而且在开始冻结后还要持续一定时间,土中水才能大部分相变为冰。土在冻结过程中的这种特点,对在负温环境中进行土方作业提供了一定条件。

许多学者的大量试验表明,土在冻结和融化过程中,其温度特征可分五个阶段(见图 2-2)。

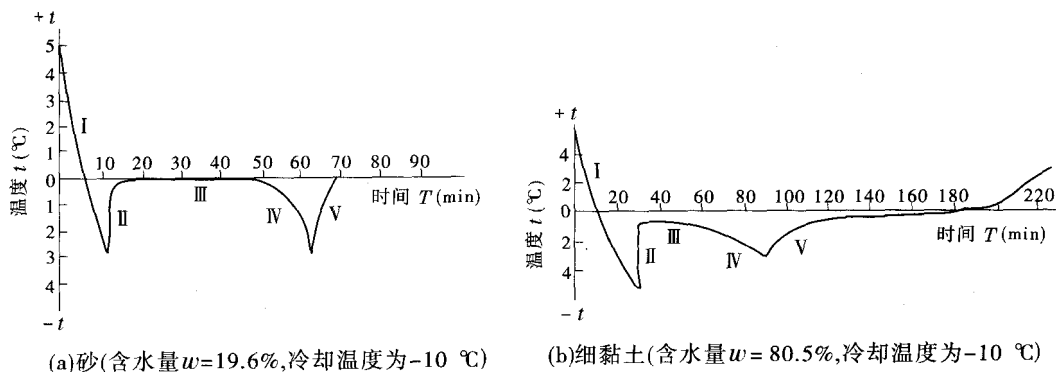


图 2-2 土的冻结与融化过程曲线

I 段:土的冷却和过冷阶段。土体温度降低到冻结温度以下,但土中水没结成冰,土体处于过冷状态。

II 段:土体温度突变阶段。土体温度剧烈上升,此时土体冰晶形成,由于水结晶相变放出潜热,而使土体温度升到土中水冻结温度。

III 段:结冰阶段。水结晶后,土体温度稳定一段时间,此时土体温度为土中水起始冻结温度。

IV 段:继续冷却阶段。土中孔隙水全部结晶后,土体温度继续下降。

V 段:融化阶段。土体温度随外界温度升高而开始回升;上升至冻土融化温度,此段土体吸收大量的热量,土中冰融化成水,当全部冰融化后,土体温度上升为正温。

2. 土冻结中水分特征

冻土中的水分由于土中水的冻结温度一般低于 $0\text{ }^{\circ}\text{C}$,而且不同类型的水冻结温度也不同,因而在一般天然负温条件下,土中总有一部分液相水不冻结,这部分水称为未冻水。未冻水量的多少,温度和土的分散度起着主要作用。分散度大的细粒土未冻水量就较多。分散度小的粗颗粒土,未冻水量就少或不存在未冻水。对各类型的土,未冻水量与温度为单值函数关系。在负温范围内温度降低,其未冻水量随之减少,而温度升高,其未冻水量

增加。几种土的未冻水量与负温关系曲线如图 2-3 所示。

由图 2-3 可以看出,水的相态变化为三个阶段:

(1)在起始冻结温度时,孔隙水冻结,为剧烈相变区,未冻水量急剧减少。

(2)在 $-3 \sim -10\text{ }^{\circ}\text{C}$ 为过渡相变区,随负温的降低未冻水量缓慢减少。

(3)在 $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$ 以下为相变稳定阶段,随负温降低未冻水量变化很小。

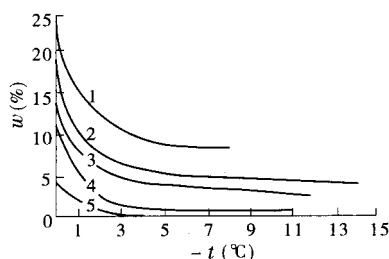


图 2-3 未冻水量与负温关系曲线

在相同温度下,未冻水含量黏土 > 亚黏土 > 亚砂土 > 砂土。

3. 冻土中的水分重分布与水分迁移

在冻结前后过程中土体中的水分分布会发生变化,对于黏性土,在土体的上部含水率比冻结前增加了,在土体的下部含水率比冻结前减小了(无地下水补给时)或增加了(有地下水补给时),同样对其他类型土也同样产生土体中水分变化的情况,这种现象称为水分重分布。

造成水分重分布的原因是在冻结过程中存在水分的迁移。水分迁移是指在外界温度梯度作用下,土体中的水分由一处移到另一处的现象,使冻土体的水分而具有不均匀性。根据土体在自然界中存在的补水状态可分为两种体系:

(1)开敞系统。有外界水源补给是指地下水位的补给,一般对于黏性土,地下水位距离冻结锋面小于地下水对冻结层无显著影响的临界深度(毛细管上升高度)时,地下水补给充分,在冻结过程中,地下水从未冻结层迁移过来到冻结锋面补充水分,使其冻结。这种在外水源补给条件下的冻结称为开敞系统条件冻结。在此形成的冻胀为开敞系统条件冻胀。此条件下的含水量包含了土体冻结前的含水量和冻结过程中迁移过来的水量。

在此条件下的细粒土冻结过程中,可以得到地下水源的补给,下卧土体中的水分向冻结锋面迁移。整个冻结的土体都比冻前的含水量有较大的增加,多数可增大 $30\% \sim 70\%$ 。对于粗粒土,下卧土体既可以补给水分,又可以自由地排出水分,因此在冻结过程中粗颗粒层的内部水分增加是不大的。当自由排水不畅时,则含水量增加。但若粗颗粒土中含细粒(粉黏粒)较多,则水分迁移现象较明显,冻结后含水量增加,冻胀也较大。

(2)封闭系统。无外水源补给,对于黏性土,当地下水位距离冻结锋面大于地下水对冻结层无显著影响的临界深度(毛细管上升高度)时,地下水不补给冻结锋面,在冻结过程中仅为冻深范围内土体中冻结前水分的冻结。这种无外界水源补给的冻结称为封闭系统条件下的冻结。在此形成的冻胀为封闭系统条件下的冻胀。

在此封闭系统条件下的细颗粒土冻结过程中,没有地下水外水源补给,冻结锋面由上向下移动,土中水分便向冻结锋面迁移。未冻土中水分向上迁移,下部土体水量减少,在 $1/3 \sim 2/3$ 最大冻深以上土中含水量都显著增加。对于粗颗粒土在冻结时,部分水在重力作用下向下层运动,使得上层土体含水量减小,表现出上部土层脱水,下部土层含水量增加,若能自由排水通畅,则含水量增加不大。当粗颗粒土中含黏粉粒较多时,则含水量分布同细颗粒土。