

冻土力学

〔苏〕H. A. 崔托维奇 著

张长庆 朱元林 译

徐伯孟 校

科学出版社

1985

冻土力学

〔苏〕H. A. 崔托维奇 著

张长庆 朱元林 译

徐伯孟 校

科学出版社

1985

内 容 简 介

本书系统论述了现代岩土力学的一个重要分支学科——冻土力学的基本原理、规律性和在工程中的实际应用。内容包括：冻土的本质、特点、物理性质；土冻结时的水分迁移、冻胀力；冻土的流变学性质与过程；冻土的强度特性及其计算指标；冻土的变形特性与地基沉降计算；冻土地基的温度场；冻土地基与基础设计计算；冻土地基的预先融化法及土方工程特点。书中除重点阐述冻土力学的基本规律和计算理论外，还通过较多算例提供了联系实际解决工程问题的方法。

全书分为两部分，共由十一章组成：第一部分为普通冻土力学（实验-基础理论）（一至六章）；第二部分为应用冻土力学（工程冻土学）（七至十一章）。全书有附图 182 幅、附表 50 个。

本书可供从事与多年冻土和季节冻土地区工程建设有关的科学工作者、工程技术人员参考，并可作为高等院校土木建筑工程、水利水电工程、交通、矿山等专业师生作为土力学地基与基础的教学参考书。

Н. А. ЦЫТОВИЧ

МЕХАНИКА МЕРЗЛЫХ ГРУНТОВ

ИЗДАТЕЛЬСТВО «ВЫСШАЯ ШКОЛА», МОСКВА, 1973

冻 土 力 学

〔苏〕Н. А. 崔托维奇 著

张长庆 朱元林 译

徐伯孟 校

责任编辑 严梵琰

科学出版社出版

北京朝阳门内大街 137 号

中国科学院印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行 各地新华书店经售

1985 年 1 月第 一 版 开本：787×1092 1/32

1985 年 1 月第一次印刷 印张：14 7/8

印数：0001—2,900 字数：338,000

统一书号：13031·2777

本社书号：3814·13—13

定价：2.50 元

译 者 的 话

我国多年冻土与季节冻土分布面积占国土总面积三分之二以上。随着冻土地区建设事业的蓬勃发展,与各类工程建设密切相关的冻土学作为一门新兴学科,已在我国取得了相应的研究成果。冻土力学作为冻土学的重要组成部分和岩土力学的一个重要分支,其理论与实践知识,已日益为我国从事冻土地区土木建筑、水利水电、交通、矿山等工程建设的广大科技人员所重视。为满足科研、生产、教学各方面需求,我们翻译了苏联 Н.А. 崔托维奇 (Н.А.Цытович) 所著《冻土力学》(Механика Мерзлых Грунтов, Изд-во «Высшая школа», 1973)。

原书作者 Н.А. 崔托维奇教授是现代冻土力学的奠基人之一,也是当今国际土力学、冻土力学界里有重要影响的知名学者,此书是他多年工作的总结性代表作。它从全面阐述冻土力学的基本原理与最重要的规律性入手,总结了该学科几十年来的重要经验,同时应用大量图表算例提供了解决工程实际问题的手段与方法。本书既反映了苏联冻土力学的研究现状和水平,也代表了这门学科当前的国际水平。因此,本书是目前公认的内容充实、完整的冻土力学专著。原书于 1973 年出版后,1975 年即由美国寒区研究与工程实验室 (U. S. Army Cold Regions Research and Engineering Laboratory) 译成英文版书名为《The Mechanics of Frozen Ground》。我们相信中译本《冻土力学》的出版,对我国广大从事冻土地区科学研究工程技术人员和有关高等院校师生有所裨益,从中得到实

• • •

效。

本书由中国科学院兰州冰川冻土研究所张长庆、朱元林翻译。其中1—2章由张长庆按俄文原版本翻译；3—11章由朱元林按英译本翻译由张长庆按俄文原版校译。译稿完成后请长春水利水电科学研究所徐伯孟审校。最后由张长庆对全书作了统一和整理。

原书第11, 17, 18, 24四幅附图因故删去,并对附图重新作了编号。

应该指出,鉴于国内冻土学方面的专业术语和译名目前尚不统一,在本书中我们虽曾为改变这一现状作了努力,但限于译者水平,译文中不妥和错误之处在所难免,切望读者不吝批评指正。

序

本书在分析正冻土、冻土和正融土的物理-力学性质及其低温过程的多年研究成果的基础上，阐述作为一门科学的冻土力学规律性及其基本的实际应用。

自从世界上第一篇研究冻土力学性质的论文〔苏联科学院永冻区自然生产力委员会 (КЕПС АН СССР) № 80 论文集集中本书作者的论文，1930 年〕问世四十年来，特别是近十多年来，发表了大量与冻土力学有关的专题论文和著作。例如，对于建立和发展冻土力学成为一门科学有重大贡献的一些名著作：第一部冻土力学书——《冻土力学基础》〔Н. А. 崔托维奇 (Н. А. Цытович) 和 М. И. 苏姆金 (М. И. Сумгин) 1937 年〕，《冻土力学原理》(Н. А. 崔托维奇，苏联科学院出版社，1952 年)曾获得 1950 年国家奖，被认为“奠定了冻土力学基础”；《正冻土、正融土和冻土力学原理》(Н. А. 崔托维奇等人所著《冻土学原理》一书的第二卷第三章，1959 年)；《冻土的流变性质及承载能力》(С. С. 维亚洛夫 (С. С. Вялов，1959 年)；《冻土变形研究》(Н. А. 崔托维奇博士论文的第二部分，1940 年)。

还应提到 Ю. К. 扎列茨基 (Ю. К. Зарезкий) (地基研究所冻土力学组)的博士论文《土体蠕变和固结理论问题及其实际应用》(1971 年)中关于冻土和正融土流变与固结课题之解析研究工作以及一些单篇专题论文。

在冻土和永久冻土热物理学方面，Г. В. Порхаев 发表了对于求解冻土融化深度及预报正融土沉降极为需要的著作

《房屋建筑物与永久冻土的热力作用》(科学出版社, 1970年)。

此外, 令人感兴趣的资料还包括莫斯科大学的《冻土研究》论文集(1961—1968年已出版八期), 《全苏第八届地冰学讨论会资料》(雅库茨克出版, 八卷, 1966年); 《永久冻土上建筑讨论会资料》(克拉斯诺雅尔斯克工业建筑设计研究院, 编辑20卷, 1964年), 以及苏联科学院西伯利亚分院冻土研究所论文集, 全苏科学研究所1号著作集(马加丹, 1961年, 1963年)和各专业杂志上的大量单篇论文, 仅近十年即达五千印刷页之多。

最后, 在1967年出版了《建筑法规》的一章“永久冻土上房屋和建筑物的地基与基础”(CH₂Π II-6, 6-66)以及针对该章所编之《设计参考资料》(C. C. 维亚洛夫和 T. B. 波尔哈耶夫主编)。

无疑, 限于本书的篇幅, 要叙述如此广泛的科学技术资料, 并非常完整地包括冻土力学所涉及的问题是不可能的。因此, 对某些问题不能如作者希望的那样作详尽论述, 从而也就无法作出全面完善的结论。

但是作者认为, 现时可以对世界上冻土力学多年研究成果, 特别是最新实验和理论资料进行分析, 并在确定对理论和实践都很重要的冻土力学规律性后作出一般性结论。

作者在本书中只是确立冻土力学的基本规律和关系, 从而可以了解冻土力学中各种最复杂的问题, 论证在永久冻土上安全修建结构物的方法; 同时主要阐述计算原则, 更多地注意在正冻土、冻土和正融土中所发生的力学过程的物理实质及其规律的分析; 关于基础结构和详细的施工方法将在《地基与基础》教程中去研究。

系统阐明冻土力学可使读者、科学工作者、工程师和大学

目 录

序.....	vii
绪论.....	1

第一部分 实验与理论

第一章 冻土的本质、特点和物理性质	19
§ 1 冻土是颗粒相互连结的多成分和多相体系	19
§ 2 冻土的基本成分	20
§ 3 土中孔隙水的冻结特点	25
§ 4 水相变成冰的特征区和冻土中的未冻水含量	31
§ 5 冻土中未冻水和冰的动力平衡	35
§ 6 冻土的物理性质	41
§ 7 冻土和多年冻土中冰的种类及其作用	48
第二章 土冻结时的水分迁移及冻胀力.....	54
§ 1 土冻结过程中水分迁移问题的研究现状	54
§ 2 正冻土中的水分分布	58
§ 3 水分迁移的动力	65
§ 4 水分迁移原理	70
§ 5 正冻土中水分迁移和冻胀的预报	72
§ 6 土作用于建筑物基础上的冻胀力	80
§ 7 防止土冻胀的措施	99
第三章 冻土的流变过程及其作用.....	108
§ 1 冻土的内部联结作用	108
§ 2 冻土流变过程的发生和发展	113
§ 3 冻土应力-应变状态的流变方程式.....	119
§ 4 冻土的应力松弛及长期强度极限	127
§ 5 冻土蠕变参数的确定	135
§ 6 冻土蠕变参数值的试验资料	140

§ 7	冻土在荷载作用下冻土流动性的某些一般结论	148
第四章	冻土的强度性质及临界强度和设计强度值	152
§ 1	冻土力学性质的不稳定性及其强度变化原因	152
§ 2	冻土的抗压和抗拉强度	160
§ 3	冻土的抗剪强度	170
§ 4	土的冻结强度	178
§ 5	冻土的抗切削破坏强度	183
§ 6	冻土的临界强度和设计强度值	189
§ 7	冻土强度算例	197
第五章	冻土在负温下的变形	204
§ 1	温度不变时冻土的变形类型	204
§ 2	冻土的弹性变形及其特征值	205
§ 3	多层冻土的弹性变形	213
§ 4	冻土的压密变形	221
§ 5	冻土的衰减蠕变变形	227
§ 6	冻土的粘塑性流动变形	232
§ 7	在恒温下塑性冻土上的基础沉降预报	235
第六章	冻土融化时的沉降	240
§ 1	冻土融化沉降预报的意义	240
§ 2	土冻结及随后融化时压缩性的变化	242
§ 3	冻土融化时的压缩	247
§ 4	正融土上基础总稳定沉降量计算	254
§ 5	粗骨架土融化时随时间沉降过程的预报	263
§ 6	细粒(粘性)土融化时沉降随时间变化过程的预报	270
§ 7	永久冻土预融时地基的沉降	285

第二部分 冻土力学的实际应用

第七章	永久冻土的工程冻土学研究	291
§ 1	工程冻土学研究的任务和范围	291
§ 2	开发地区的综合工程冻土测绘	295

§ 3	多年冻土的现场和实验室试验研究	299
§ 4	冻土站的定位观测	305
第八章	建筑场地永久冻土的温度稳定性	307
§ 1	问题的意义及其解决途径	307
§ 2	建筑场地多年冻土层一般温度稳定性的评价	310
§ 3	局部因素对多年冻土层温度场的影响	313
§ 4	永久冻土条件下当地材料坝的温度稳定性	325
第九章	保持或加强冻结状态时多年冻土上的地基和基础	341
§ 1	选择建筑原则和基础设计方法的基本前提	341
§ 2	保持地基土冻结状态的方法	346
§ 3	加强地基土冻结状态的措施	358
§ 4	用保持地基土冻结状态法建筑的基础计算	363
§ 5	冻胀力作用下基础稳定性和强度的校核	375
§ 6	降低基础冻胀力的措施	380
§ 7	实例	382
第十章	正融土上的地基和基础	391
§ 1	允许在正融土上建筑的条件	391
§ 2	正融和已融地基土的承载能力	394
§ 3	按正融地基的极限变形(沉降)计算基础	397
§ 4	基础与正融地基联合工作的考虑	417
§ 5	考虑地基融化时永久冻土上的基础结构	421
第十一章	永久冻土区地基预融及土方工程的特点	426
§ 1	在永久冻土上施工时应用预融地基的条件	426
§ 2	预融深度的选择	428
§ 3	地基预融后允许工程开始施工时间的确定	432
§ 4	预融永久冻土的施工方法	433
§ 5	已融土的压实和加固方法	438
§ 6	永久冻土条件下土方工程施工的特点	443
参考文献		458

绪 论

永久冻土上修造建筑物的困难性。在面积约一千一百万平方公里的苏联北方和东北部广大地区以及其他国家（加拿大北方，阿拉斯加）几乎与此面积相等的地区、土、土壤和一般地说岩石夏季融化不大的深度（例如1—3米），而更深处（达50—1000米）则恒定的（世纪的）处于冻结状态。

修建于永久冻土上的建筑物，如不采取与一般条件不同的特殊措施和方法，则将产生完全不能允许的变形，使建筑物运行管理困难，甚至引起建筑物完全破坏。

冻土和永久冻土，由于其中存在冰胶结连结而当保持其负温时，乃是足够坚硬和稳定的天然形成物。但当其温度升高或降低时（甚至在负温范围里）土的性质将发生重大变化，从而决定了冻岩的不稳定性。当孔隙冰融化时，土结构中的冰胶结作用随即破坏并产生显著变形，这时，粉质和粘性的富冰永久冻土将变成稀释体。

对低含水量（弱含冰的）冻土，孔隙冰融化使土颗粒间的冰胶结连结作用遭到破坏，结构稳定性降低，融化后土的压缩性和透水性显著增大，强度降低许多倍。含冰土和富冰（被冰过饱和的）冻土融化时结构立即破坏，孔隙度突变，此时，在冰融化处发生快速的进行式局部下沉，并常伴随以已融土的稀释体从承重面（例如从建筑物的基础下面）挤出。

沉陷是永久冻土上建筑物未采取专门措施以防止地基融化而出现不允许变形的最主要原因。

在永久冻土分布区，特别是极北部地区，修造建筑物的条

件由于表层土壤过湿，在冻结状态下又为冰过饱和而更形复杂化。图1表示在阿尔丹地区铺筑土质道路所开挖的路堑，因表层土过湿，土方工程非常复杂。此外，往往在夏融深度即永久冻土上限处见有过饱和冰层，融化时变成稀释体。

如永久冻土上的多年建筑实践所表明，当房屋建筑物和结构物地基的永久冻土融化时，基础和基础上部结构产生明显的。往往是根本不能允许的变形。例如，据 П. Д. Бондарев 的资料，沃尔库塔城及其郊区修建在永久冻土上的房屋约 80% 出现了不许可变形，其中石质（砖砌）建筑剧烈变形的占 78%（6% 的房屋墙体完全毁坏，67% 的房屋产生贯通裂缝）；圆木房屋占 75%，木排架房屋达 90%。所调查的 30%

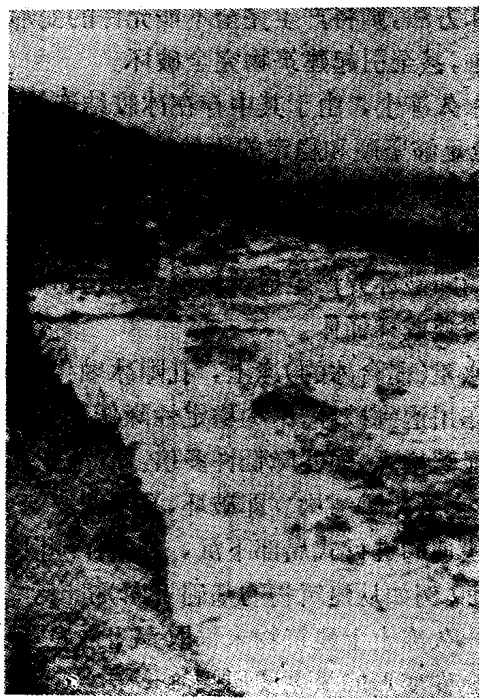


图1 在永久冻土区铺筑土质道路



图2 矿渣混凝土锅炉房的变形

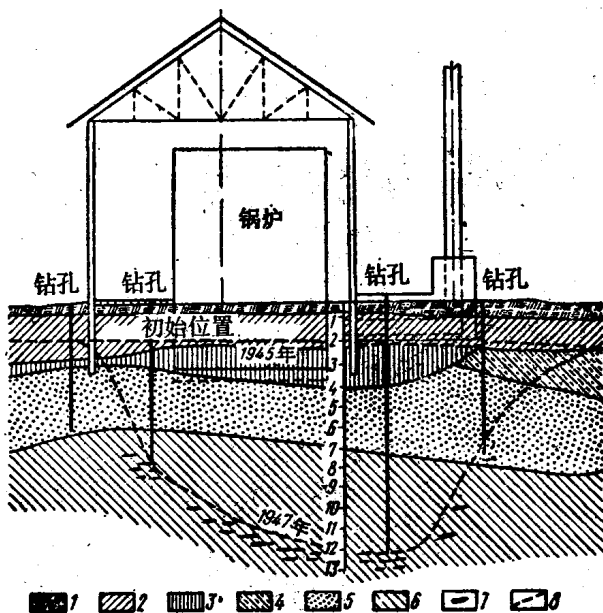


图3 锅炉房地基冻土的“融化盘”

- 1——回填土；2, 3, 6——各类亚粘土；4——亚砂土；5——细砂；
7——冰透镜体；8——永久冻土的初始位置和房屋运行两年后的位置

石砌房屋有剧烈变形急待大修,而 50% 木屋则必须大修。

图 2 表示烟囱业已倾斜的矿渣混凝土锅炉房(因地基不均匀下沉),而图 3 表示该屋的横剖面 and 标有永久冻土界限的屋下土层:最初位置(1945 年)和锅炉房未采用从土中散热措施运行两年(1947 年)后的位置。由于基础施工不当(未排热),在运行两年里锅炉下沉达 40 厘米,水泥板散落,而烟囱的混凝土基础因不均匀下沉而向锅炉房倾斜,促使锅炉房下土体形成不对称的《融化盘》。

图 4 是一个因显著不均匀下沉造成厂房大量裂缝的例子。图中表示未考虑永久冻土性质修筑的阿纳第尔镇渔业工厂厂房的一间内室。该屋变形是如此之大,以致变形继续发展导致房屋完全破坏。

图 5 表示了哈里麦尔-尤镇(位于沃尔库塔北)某木结构楼房使用一年后墙脚和墙体的不均匀下沉情形。变形是由于



图 4 丘科特克面包厂地板裂缝

基础底板下富冰冻土融化下沉产生的。

永久冻土条件下结构物产生显著变形的另一个非常重要的原因乃是土体上层明显而不均匀的冻胀作用和周围土冻结时基础隆起。当有流水进入或永久冻土上限处赋存过湿层时，这种冻胀隆起作用特别剧烈。例如图 6 表示雅库茨克市一个木制大门在冻胀力作用下不均匀隆起的情形。冻胀力可具有很大的数值，如不采取防止措施使之减小到允许程度，将导致基础不均匀隆起和建筑物显著变形。图

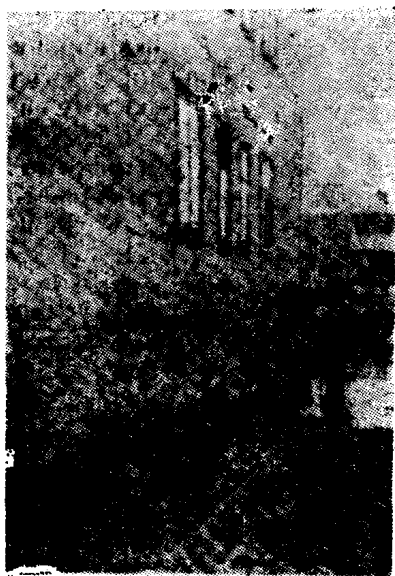


图 5 哈里麦尔-尤镇住宅墙脚和墙体下沉

7 表示伊加尔城地区冻胀丘开裂，将相当粗大的落叶松树干劈开的情形，由此可见冻胀值数值之大。

还可列举许多因正融土不均匀下沉或富冰土融化下沉，或基础不均匀冻胀隆起所引起的结构物变形实例。直到最近，这样的例子在永久冻土地区仍到处可见。

从所有上述情况清楚可见，永久冻土上建筑物稳定的理论前提和实用方法的拟定，都必须建立在考虑永久冻土地区特点，仔细研究正冻土、冻土、正融土的性质，研究在自然因素和与建筑物相互作用影响下土中所发生的力学过程，寻求改变土质使之朝预期方向变化的途径和措施等的基础之上。

但是应当指出，基于对正冻土、冻土和正融土物理力学

性质多年理论-实验研究进行综合所得出的有关冻土力学结



图6 雅库茨克市一木制大门因土不均匀冻胀而歪斜

论，目前已有可能建立起保证永久冻土上建筑物稳定的科学基础，本书第二部分将对此予以论述。

应该指出，就是我国最早有关计算永久冻土上建筑物基础的著作（本书作者 1928—1930 年的著作，在此之前既无本国的技术文献，也无外国的有关著作）即已正确地拟定了永久冻土上建造建筑物的总路线和基本原则，实践已

进一步完全证实了它们的正确性。

例如，早在 1928 年，本书作者首先通过计算论证提出应



图7 冻胀丘开裂将树干(落叶松)劈开

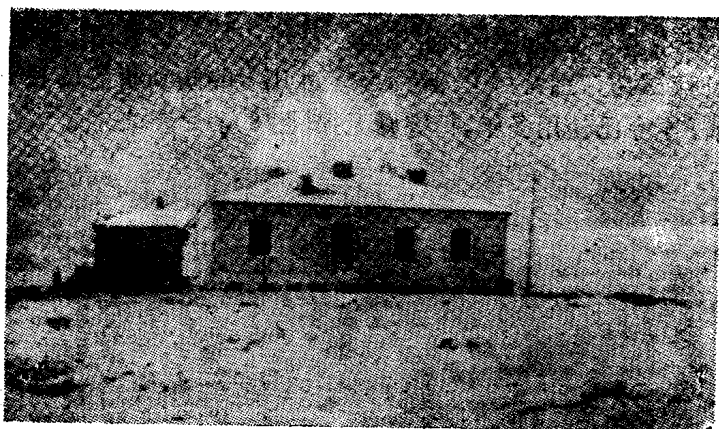


图8 别特洛夫冰川上的纳利斯基高山气象站

用通风地下室，使得有可能制定出目前广泛而有效地应用的按保持地基冻结状态原则修筑永久冻土上建筑物的方法。

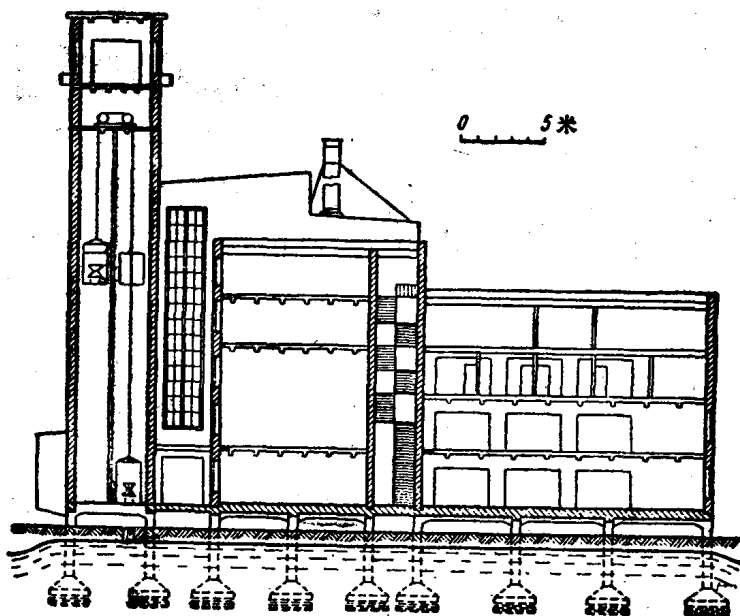


图9 按保持地基土冻结法修建的第一座工业厂房(ЯИЭС)剖面图