

FROZEN SOIL MECHANICS SERIES

冻土力学系列丛书

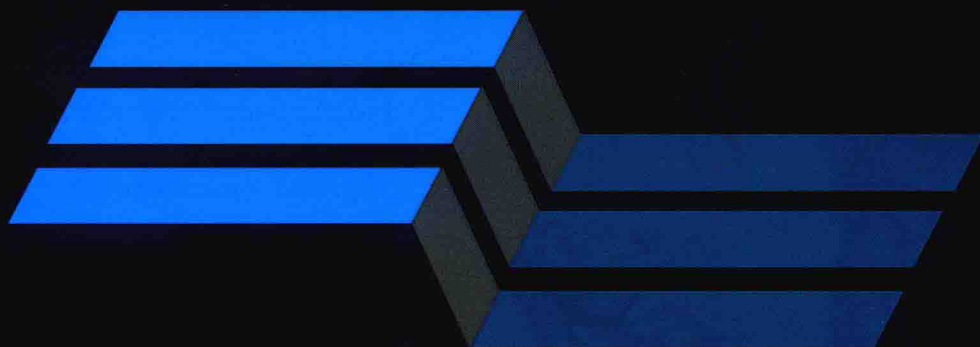
主编 马巍

冻土破坏力学

〔俄罗斯〕B.B.苏里科夫 著

侯鑫 张泽 王学明 袁俊 译

武俊杰 周成林 刘华 校



科学出版社

冻土力学系列丛书

主 编 马 巍

冻土破坏力学

[俄罗斯] B. B. 苏里科夫 著

侯 鑫 张 泽 王学明 袁 俊 译

武俊杰 周成林 刘 华 校

国家重点基础研究发展计划项目 (973 项目) (2012CB026406)
国家自然科学基金重点项目 (41630636)
冻土工程国家重点实验室
西北电力设计院技术创新项目 (XB1-TM04-2013)
国家自然科学基金青年科学基金项目 (41301070)
陕西省教育厅专项科研基金项目 (15JK1406)



科 学 出 版 社

北 京

内 容 简 介

本书译自苏联冻土破坏力学专家 B. B. 苏里科夫教授于 1978 年出版的《Механика разрушения мерзлых грунтов》。本书从冻土的基本物理力学性质入手,分析了土体在冻结和外力作用下的力学行为过程。将冻土视为在机械荷载作用下发生破坏的介质,分析了不同种类机械与冻土的相互作用条件,研究了在机械振动荷载过程中冻土破坏的过程,并提出了相关的理论和试验研究体系。

本书可作为我国寒区工程及相关工程机械制造方面的科研、设计人员及相关专业研究生、教师的参考书。

图书在版编目 (CIP) 数据

冻土破坏力学 / (俄罗斯) B. B. 苏里科夫著; 侯鑫等译. —北京: 科学出版社, 2016. 11

(冻土力学系列丛书)

ISBN 978-7-03-050726-6

I. ①冻… II. ①B… ②侯… III. ①冻土力学 IV. ①P642. 14

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2016) 第 279389 号

责任编辑: 张井飞 / 责任校对: 何艳萍

责任印制: 张 伟 / 封面设计: 耕者设计工作室

科学出版社 出版

北京东黄城根北街 16 号

邮政编码: 100717

<http://www.sciencep.com>

北京教图印刷有限公司 印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2016 年 11 月第 一 版 开本: 720×1000 1/16

2016 年 11 月第一次印刷 印张: 7 1/4

字数: 153 000

定价: 78.00 元

(如有印装质量问题, 我社负责调换)

《冻土力学系列丛书》序

冻土，是一种由固体土颗粒、冰、液态水和气体四种基本成分所组成的非均质、各相异性的多相复合体。一般情况下，把温度在 0°C 或 0°C 以下，并含有冰的各种岩石和土壤都称作冻土。由于冻土中的水受环境温度的波动在未冻水和冰之间相互转化，从而导致冻土的力学性质表现出强烈的温度敏感性和流变性。冻土力学成为一门学科始于19世纪末至20世纪初，它是由于在苏联外修建西伯利亚铁路和大型工业与民用建筑的需要而产生的。而后，美国、加拿大、中国等国相继开展了冻土力学研究，取得了一系列重要成果。我国对冻土力学的研究始于20世纪60年代，更是成果卓著。目前，在各国科学家的共同努力下，冻土力学已发展成为了一门完整的新型学科。

如何让更多的人了解冻土、了解冻土力学，如何让冻土力学在寒区开发及建设中发挥更大的作用，我们将组织一批学者编著和翻译相关世界各国的冻土力学成果，形成《冻土力学系列丛书》，力图以更开阔的视角向读者展示冻土力学所涉及的研究领域、研究方法和研究热点，希望能从更广阔的视角为广大科技人员和学生提供一个学习和研究冻土力学的基本思路、方法、框架和基础资料，同时也能够了解和体会冻土力学与土力学学科之间研究方法的异同，有助于我国冻土力学的研究和发展。同时，也希望能为我国寒区工程科研、设计人员以及有关学科、专业的师生提供系列参考用书。

衷心地感谢我的同事们在此丛书中所做的努力和贡献，也欢迎各界同仁对此丛书提出批评、建议和监督。希望我们的工作能为社会添砖加瓦，希望我们的冻土力学学科欣欣向荣！

中国科学院寒区旱区环境与工程研究所 马巍

2016年3月4日

中文版序言

冻土破坏力学是冻土力学的一个分支。冻土的形成伴随着强烈的缺陷发育，是在结构和物理力学性质上呈现不均一性的复杂介质。其缺陷可以表现为存在于其中的微、巨裂隙，大量的错位断层和空隙，应力集中区域，杂质等。在发生变形时，介质内的缺陷会促进裂缝的形成与增长，裂缝进一步发育会造成冻土结构状态的破坏。所谓材料的破坏，实质上就是指将材料分为多个独立个体的新的表面的发育过程。冻土破坏力学是基于对材料（无缺陷和存在内部缺陷的）中裂缝发育条件和其物理力学性质、应力作用之间联系的研究而建立的。

随着寒区经济建设的推进，在多年冻土和季节冻土区的建设不可避免地需要进行冻土开挖工程，而我国在冻土开挖工程方面的研究目前还处于起步阶段。据了解冻土区土方作业的成本是融土区的5倍以上。

冻土破坏力学的研究，有助于指导和消除不同领域工程建设的季节性约束，选择适合的机械开挖方法，减少冻土土方工程的建设周期，而且还可以优化生产流程，减少项目的盲目性。

B. B. 苏里科夫教授《冻土破坏力学》一书将冻土视为在机械荷载作用下发生破坏的介质，分析了不同种类机械与冻土的相互作用条件，研究了在机械振动荷载过程中冻土破坏的过程，并提出了相关的理论和试验研究体系。本书是冻土破坏力学经典的论著，虽然篇幅不长，但理论和实用性很强。希望通过本书让大家更多地了解冻土破坏力学这一学科的研究和发展，同时希望能为我国寒区工程及相关工程机械制造方面的科研、设计人员及相关专业研究生、教师提供参考。

马巍

中国科学院寒区旱区环境与工程研究所
2016年9月8日于兰州

前 言

第XXV届苏联共产党代表大会已经预见到在广阔分布着多年和季节性冻土的远东地区、西伯利亚、极北地区和俄罗斯联邦政府管辖范围内的非黑土地地区，生产力将如雨后春笋般不断提高。而俄罗斯将近47%的领土上均发育着多年冻土。

根据中央组织化、机械化和技术援助建设科研实验设计研究院的资料，在1975年出于建设需要进行的冻土开挖土方量大约为10亿 m^3 ，而截至第十个“五年计划”末期这个数字应该能增加数倍，并占据每年生产活动所需土方总作业量的25%~30%。价值为100万卢布的建设安装工程平均能进行15万~200万 m^3 的土方作业量，水利建设项目甚至能达到200万~250万 m^3 。同时，冻土土方作业的成本大约是融土条件下的5倍以上。

在现有的破坏冻土的建筑作业方法中，最普遍的为利用专业机械的力学方法。

通过研究机械元件与土体间的相互作用过程并尝试加以改善，能令机械元件有效地进行冻土区土方作业，进而制作出新型的掘土机械。

冻土是缺陷强烈发育的、在结构和物理力学性质上呈现不均一性的复杂介质。其缺陷表现为存在于其中的微、巨裂隙，以及大量的错位断层和空隙、应力集中区域、杂质等。即使是一些相对均一的连续性介质（如金属和合金），在每平方厘米面积上切割的位错总长度也可达到10~1000km，或者以数量计可达到 $10^8 \sim 10^{12}$ 条。

在发生变形时，介质内的缺陷会促进裂缝的形成与增长，裂缝进一步发育会造成冻土结构状态的破坏，同时裂缝的扩展方式将决定其破坏特征是脆性还是脆脆性。

冻土破坏力学是基于对材料（无缺陷和存在内部缺陷的）中裂缝发育条件及其物理力学性质、应力作用之间联系的研究而建立的。所谓材料的破坏，实质上就是指将材料分为 n （ $n \geq 2$ ）个独立个体的新表面的发育过程。

在使用冻土作为地基材料时，应当令其裂缝的发育过程尽可能缓慢，使地基具有长期的承载力。因为裂缝的发育会为冻土的破坏提供条件，而外部作用施加

的速度将决定冻土短期强度的特征。

由于在线性弹性力学破坏和流变破坏之间缺乏明确的界限，关于冻土破坏的理论描述距离完善尚有很长的路要走，其未来的发展趋势将是通过不断深入的实验和理论研究，建立起半经验的静力学理论。

本书将冻土视为在机械荷载作用下发生破坏的介质，给出了相关概念。

本书并不奢求能够给出全面详实的关于冻土破坏问题的论述，而且书中所涉及的许多问题都有待进一步讨论研究。

本书的撰写有赖于作者在该方向长久以来的研究工作。同时作者在此向 A. N. 泽列宁（莫斯科国立汽车和道路技术学院），M. I. 嘉里别林（全苏土木工程函授学院），I. P. 巴尔巴昌（中央组织化、机械化和技术援助建设科研实验设计研究院），S. H. 瓦尔塔诺夫（全苏土方机械工程研究所），A. M. 古林（乌拉尔国立技术学院），G. A. 什罗逸朵（全苏建筑机械工程研究所），以及为本书的准备与出版提供了大量建议和帮助的莫斯科水利土壤改良研究所土质改良和建筑机械教研室的全体成员致以诚挚的谢意。

目 录

《冻土力学系列丛书》序

中文版序言

前言

第 1 章 冻土的物理力学性质	1
1.1 冻土中未冻水含量及冻结条件	2
1.2 季节冻土的冻结深度	4
1.3 在施加瞬时荷载条件下冻土的强度性质	5
1.4 在加压条件下超声波振动、强电磁场和盐渍化对冻土瞬时强度的影响	15
1.5 冻土的摩阻	18
1.6 土体冻结时不同表面的强度	19
1.7 在动力（动荷载）作用下冻土的力学性质	23
1.8 应力集中对冻土瞬时强度的影响	28
1.9 冻土的温度变形和热流变性质	29
1.10 冻土的弹性	35
第 2 章 冬季期间的土体开挖方法分类	43
2.1 预防土体冻结	43
2.2 融化冻土	45
2.3 翻松冻土	46
2.4 冻土的机械化加工	49
2.5 用于破坏冻土结构状态的机械设备的对比分析	49
第 3 章 动荷载下冻土破坏的实验-理论基础	52
3.1 黏土形态对冻土破坏能耗的影响	52
3.2 冲击机械的有效作用参数	63
3.3 击打式和坠落式施工装置的对比性效率	68

3.4 动荷载作用下的冻土破坏	72
3.5 在半空间内楔形物和压膜压入规律	75
3.6 冻土脆性破坏的力学原理	80
3.7 动荷载作用下冻土破坏的实验-理论关系	87
3.8 冻土的力学模型	96
参考文献	98

第 1 章 冻土的物理力学性质

正如 N. A. 崔托维奇所言：“我们将处于负温或零摄氏度，并且其中的部分或者全部水分冻结成冰，并以此将矿物颗粒胶结硬化的土体或岩石称为冻土和冻岩。”^[1]这就意味着处于分散性材料空隙中的水分结晶成冰后，其胶结能力改变了冻土的物理力学性质。

冻土能够在不同的方法作用下发生破坏，其中最为主要的当属机械方法。

冻土属于弹性-黏塑性的四相固体（土粒骨架、气体、未冻水和冰）。冻结水的胶结能力决定了冻土的力学强度和破坏能耗。

随着气温的降低，由土粒骨架和气体组分所构成的固体矿物颗粒的性质变化不大，而在负温条件下部分水分相变成冰。冰晶体和矿物骨架颗粒之间的胶结联结通过未冻水膜、冰晶体和矿物骨架矿物颗粒三者的相互作用实现。该联结状态会随着外部影响和温度下降而变化，由此导致了冻土的不稳定性——随着温度降低，在不同力的作用下冻土强度表现出增强的趋势。

在冻结过程中土体会形成特殊的冷生构造，当土中所有的水分均冻结成冰时为整体构造；当土中的冰主要以平行层状出现时为层状构造；当冰以或多或少的规律性分布的网状出现时为网状构造^[2]。

根据冻土（多年冻土、季节冻土、短期冻土）中矿物骨架与冰之间的联结方式可以将冻土划分为坚硬冻土、塑性冻土和散体冻土。散体冻土主要是含水量不大的大块土和粗粒分散土的典型状态。

坚硬冻土的特征表现为实际不可压缩和脆性破坏的特点。塑性冻土则表现为具有黏性，并且由于未冻水含量高，在荷载作用下能够发生压缩。上述冻土主要为负温条件下的细分散土体，同时还应满足：粉砂温度不低于 -0.3°C ；亚砂土温度不低于 -0.6°C ；亚黏土温度不低于 -1.0°C ；黏土温度不低于 -1.3°C 。

矿物颗粒间的胶结程度主要由含冰量决定。根据含冰量大小可将冻土划分为少冰冻土（含冰量 $<25\%$ ）、多冰冻土（含冰量为 $25\% \sim 50\%$ ）和富冰冻土（含冰量 $>50\%$ ）。

含冰量、未冻水含量和外界荷载特征共同决定了冻土是作为脆性介质破坏还是作为塑性介质破坏。

恒定的外界作用将令冰、未冻水、变形和荷载本身之间形成动力平衡。外界因素和冻土各独立组分的性质相互影响造成了物理力学性质的不稳定性。因此，冻土的变形取决于外部荷载，而这些外部荷载也密切关系到系统状态和外形的改变，即外部荷载也依附于介质的形变性质，并以此为转移。开展冻土力学研究的主要思想之一就是动力平衡。

冻土的物理力学性质利用概率模型的形式表现，因此破坏过程应按照不变对比关系式原理进行观察研究。

形成冻土性质的主导过程有与周围环境的热交换，这个过程的变化将导致二次相互作用过程的发育（如冷却和加热，水分的相变，水分、盐分和矿物颗粒的迁移，膨胀和沉降，冻裂隙，冻土流等）。

面对不同方式的破坏，冻土的抵抗力由密度、含水量、温度、含冰量、力学强度、外部荷载、冻结强度、矿化程度、弹性参数、电性参数、热物理参数、热流变参数和其他有关参数共同确定。

1.1 冻土中未冻水含量及冻结条件

按照 A. F. 列别捷夫教授的分类方法，土体中的水分可以划分为吸附水、薄膜水、毛细水、重力水和水蒸气。

水分与矿物骨架的联结方式（按 P. A. 列宾捷尔院士的提议）有化学联结、物理-化学联结和物理-力学联结。

水相变成冰共经过三步骤：过冷、结晶和按 2 : 20 : 1 的比例冷却^[3]。

在气孔和毛细管中的水分结晶化呈现跳跃式的特点：首先在温度低于 0℃ 时开始发生结晶化，随后由于冰形成时会释放热量，导致水分温度升高。过冷现象取决于土体含水量、矿化程度和冷却强度。

温度的跳跃值随着土体分散性的增加而减小，而冻结温度随之降低。

工作中^[4]给出了过冷和冻结的温度区间，对于中粒砂该数值为 -3℃ 和 0℃；亚黏土为 -3.3 ~ -4.0℃ 和 -0.1 ~ -0.9℃；黏土为 -4.9℃ 和 -0.7℃。

一般来说^[5,6]，存在于岩石中并经冻结而成的冰基本上都具有多孔性。根据形成的特点可以将其分为以下几类：胶结冰、侵入冰、渗透冰、升华冰、分凝冰和

复合冰。

在初始阶段重力水首先结晶化,之后依次是毛细水、强结合水(冻结温度低于 $-75\sim-80^{\circ}\text{C}$)。毛细水冻结温度取决于毛细管直径,当直径为 1.57mm 时为 -6.4°C ,当直径为 0.06mm 时为 -18.5°C 。

在结晶过程中形成的冰具有不同的力学性质。鉴于外部媒介的温度及其变化强度和压力大小,可以按照密度($0.9168\sim 0.9483\text{g}/\text{cm}^3$ 到 $1.67\text{g}/\text{cm}^3$)、相变温度和压力的特点将冰划分为不同类型(冰I—冰VII)。

在自然界分布最广的是冰I,它在普通的压力和温度(低至 -70°C)条件下能够稳定存在。冰I具有六角形结构并表现出强烈的各向异性特点。

冰VII能够在 $200\sim 250\text{Pa}$ 的压力和低至 -200°C 的温度下存在,同时当温度为 $+81.6^{\circ}\text{C}$ 和 217Pa 的压力下相变成水。

由于冰的膨胀性和水分的低压缩性,在闭合裂缝中会产生高压(达到 250MPa)。这个现象会改变相变温度和冰的变形状态。

决定冻土形成的重要因素是冻结时间,在自然条件下它取决于土体和周围空气的温度、土体体积和含水量、风向和风速等多方面的条件。大致的情况为:当四周气温为 -5°C 时土体可保持融土状态 1.5h ,当四周气温为 -30°C 时土体可保持融土状态 20min 。

结构未破坏的土体冻结所需时间要长得多,因为下伏土层会源源不断地向上输送热流(对于季节冻土而言)。黏性土冻结平均速度为:当温度为 -10°C 时为 $2.7\sim 3.1\text{cm}/\text{d}$,当温度为 -30°C 时为 $7.8\sim 8.4\text{cm}/\text{d}$ 。如果有雪盖存在则冻结速度降低 $15\%\sim 25\%$ 。风速同样影响着土体冻结的强烈程度。相比风速 $6\sim 7\text{m}/\text{s}$ 的情况,无风天气下的黏土和亚黏土的冻结速度要降低 $1.5\sim 2$ 倍。

N. A. 崔托维奇和 M. I. 苏姆金提出:“在冻土中一部分液态水可与冰同时存在”。N. A. 崔托维奇更进一步建立了冻土中冰-水动力平衡原理:“包含在冻土中的冰与未冻水的数量、成分和性质并非一成不变,它们随着外部作用的变化而变化,并最终趋于一个动力平衡状态”。

水的液固相平衡的热力学条件是温度、压力和化学势的平衡。液固相的密度对应于未冻水含量百分比,均取决于不同变形方式的冰水相变的温度和压力,以及负温数值、土体分散性和外部压力,而实际上如果含水量不超过最大分子含水量(强结合水)时,则并非取决于含水量。

《全苏建筑规范与标准》(SNIP) II-B. 6—66 制定了未冻水与土体分散性程度

(塑性指数) 和含水量之间的量化关系, 并以公式表述如下:

$$W_H = kw_p$$

式中, W_H 为未冻水含量; k 为由塑性指数、温度和土体类型决定的参数; w_p 为土体含水量。

随着负温的降低, 在粗粒分散土体中的未冻水数量降低得尤其剧烈。在细分散土体中甚至是在极低的温度条件下 ($-40 \sim -60^\circ\text{C}$), 未冻水的比重相当高, 这些未冻水以厚度约为几个分子层大小的薄膜形式覆盖于土体颗粒和冰结晶表面^[7]。众所周知^[2], 强结合水即使是在 -190°C 的情况下依然不发生冻结, 其正是存在于水分表面的极强电分子的键合力作用导致的。

未冻水数量取决于水溶性化合物的饱和度和矿化程度。随着浓度的增大, 土体的冻结温度降低, 而土中未冻水含量增加。

1.2 季节冻土的冻结深度

开挖冻土的机械设备和方法的选择决定于季节冻土的冻结深度。

影响冻结深度的因素众多, 如周围气温、雪盖及其特点, 土体含水量和物理力学性质, 潜水水位, 区域地形和植被特点, 以及其他因素。

冻结深度由冻结指数确定。随着冻结指数的增加冻结深度增大, 这个现象在冬季初期表现得尤为突出。

根据中央组织化、机械化和技术援助建设科研实验设计研究院的资料^[8], 观察研究了含水量为 30% ~ 40% 情况下的最大冻结深度。黏性土冻结速度较慢, 较快的是砂土。当含水量为 30%, 经过 1000 天冻结温度为负温的持续影响, 黏土的冻结深度为 1.74m, 亚黏土为 1.84m, 亚砂土为 1.91m, 而砂土为 1.96m。

雪盖和植被能够改变地表的热交换状态, 当雪盖厚度为 0.25 ~ 0.5m 时冻结深度减小 15% ~ 30%, 而上覆有较厚的青苔层时冻结深度可减小 50% ~ 60%。非黑土区的泥炭田一般冻结深度为 0.3 ~ 0.5m。

在冬季进行掘土作业时, 绝热材料和专用措施铺就的土体覆盖层能够保证土体长时间维持在融化状态或者实际上减小冻结深度。

冻土的温度场随着深度和时间的变化而变化。最上层承受了最强烈的热量影响, 地表温度接近于气温。随着深度增加、温度上升直至到达冻结零度等温线。在多年冻土中, 随着深度增加, 土体温度逐渐稳定至一个恒定的负温。季节冻土

的等温场具有明显的冻结锋面位移的极端特点：在经历了最冷时期后的1.5~2个月对最大冻结深度进行观察，冻结深度超过2m的冻土完全融化发生在严寒过去后的20~40d。土体融化自底部开始，而伴随着春季的到来，融化亦从地表向下发展。

在土体冻结和融化过程中发生变化的还有比重、含水量和强度。随着深度的变化这些性质也并非一成不变。例如，对于亚黏土，当冻结深度为1.6m时，距离地表标高为0.2m处的瞬时抗压强度为10.5MPa，含水量为25%，而标高为1.0m处相应的瞬时抗压强度为4.8MPa，含水量为21%。对于亚砂土，当其冻结深度为1.8m时，相应标高处的瞬时抗压强度降低近3倍，含水量变化值约为6%。

在制造冻土挖掘机械时，土体随着冻结深度不同所呈现的强度特点的不恒定性必须要加以考虑。

1.3 在施加瞬时荷载条件下冻土的强度性质

为了分析冻土的强度性质，需要运用到单元形变的瞬时阻抗值，包括抗压、抗拉、抗剪和抗弯等。众所周知，这些阻抗值并不单单取决于土体的粒度成分、含水量和湿度，还取决于荷载施加速度，样品的几何形状、尺寸和制备方法，样品和压缩模板的接触条件，应力集中和其他因素。

在确定条件下结构破坏和未破坏的样品强度系数的区别，在允许的最小偏差范围内，实验条件下取得的强度值接近于机械作用于整体土体的实际强度值。

冻土的特例多样性和力学性质的不固定性、实验的不可比拟性、统一试验方法的缺乏，这些因素都无法保证取得的实验数据能够适用于工程计算，也无法提供对不同作者的研究结果进行量化评估的可能性。

我们着手尝试科学地论证建立冻土强度的条件说明^[9]。在这些实验中的恒量为：粒度成分，样品制备方法、尺寸和几何形状，荷载施加速度，边界条件；变量为含水量和温度。

使用专门的模型、4700Pa的恒定荷载、震动频率46.6Hz、震动时间20s的震动方法制成必需的形状和尺寸，恒定的强度、含水量和成分的土样。为了确定土体密度与含水量之间的相关性而制定了辅助的图表。在振动过后模具中的过量土会被排除，将盛有土的模具移入冷冻舱。经过1.5~2h后用专门的凸模将样品压出模具，为了防止水分的流失用聚乙烯膜包裹住土样并将其保存在冷冻舱内直至

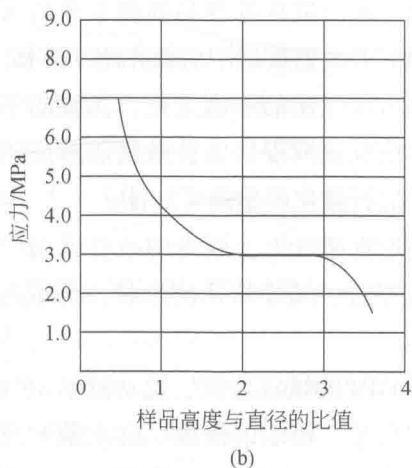
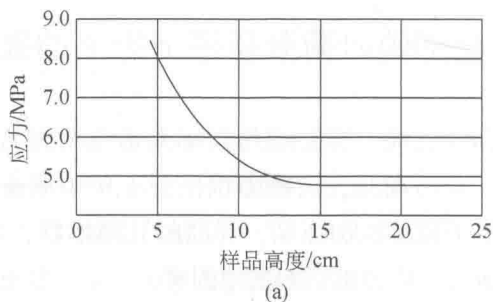
温度稳定为止。

土样的几何形状和尺寸影响了强度系数。在单轴压缩试验中使用的是立方体、棱柱体和圆柱体土样。在文献中也大量阐述了比例因素对岩石^[10,11,12,13,14]、冰^[15]、冻土^[16,17,18]的强度系数的影响。

A. N. 泽列宁^[16]指出：“随着立方体土样尺寸的增加，其尺寸的影响力减小”，实际上对于5cm×5cm×5cm的立方体而言基本是稳定的。

为了规范实验土样的形状和尺寸的选取，针对-10℃温度下含水率为10%的柳别尔齐砂进行了相关实验。

对底面为15cm×15cm，高度分别为5cm、10cm、15cm、20cm和25cm的棱柱体土样进行压缩试验得知，当高和宽的比例大于或等于1:1时应力趋于稳定且不再受该比例因素制约 [图 1-1 (a)]。



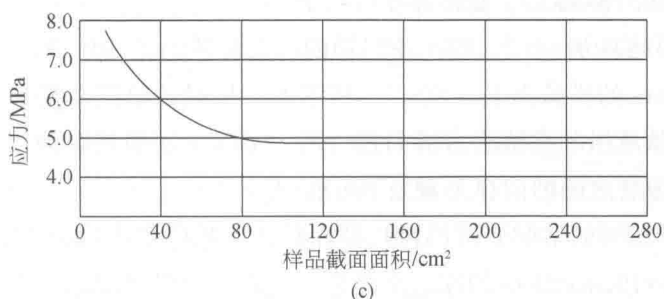


图 1-1 比例因素对温度为 -10°C ，含水率为 10% 的冻结柳别尔齐砂的瞬时抗压强度的影响
(a) 在底面为 $15\text{cm}\times 15\text{cm}$ 时随高度变化的曲线；(b) 在直径为 10cm 时随高度与直径比值变化的曲线；
(c) 随样品截面面积变化的曲线

对于直径为 10cm ，高度与直径的比值为 $2\sim 3$ 的圆柱体土样，可以认为其状态固定，因为在该区间范围内其应力情况固定 [图 1-1 (b)]。

对尺寸分别为 5cm 、 10cm 、 15cm 的立方体的单轴压缩实验显示，当面积大于 100cm^2 时破坏应力趋于稳定 [图 1-1 (c)]。

对于拉伸条件下的强度实验，土样的尺寸选择应适宜，以便消除衬圈变形和令破坏发生在固定截面区域。将固定截面为 $10\text{cm}\times 10\text{cm}$ 的样品长度定为 30cm 。利用这样的样品进行弯折、切断和冲击黏性实验。在抗弯试验中样品被放置在压力机活动部分的两个滚柱支座上，而荷载施加于样品中央。

在进行切断试验时，样品被安置于专门的套环中，该套环可以降低加荷区域内的压缩应力，切面总表面积为 200cm^2 。

荷载施加速度不仅影响了瞬时强度，还影响了冻土的破坏特点。随着速度的增加，土体的脆性增加塑性降低。

研究显示^[19]，在变形速率变化 ($0.26\sim 10.7\text{mm/s}$) 的情况下，土体的瞬时抗拉强度实际上并未改变。冻砂的瞬时单轴抗压阻抗也未改变。同时，随着变形速率增大 12 倍，冻黏土的瞬时阻抗增长近 2 倍，当变形速率大于 8mm/s 时冻黏土的瞬时单轴抗压阻抗甚至超过了砂。

实验显示，对于所有类型的土体，随着荷载施加速度的降低，瞬时压缩阻抗减小，同时土中的塑性变形增大。随着土体中变形速度的增大，弹性增大并转变为斜面脆性破坏。

在实验室条件下设备的技术能力限制了速度变化区间。因此，对于综合试验

机械 YMM-10 和 YMM-50, 变形速度可从 $0\text{mm}/\text{min}$ 变化至 $100\text{mm}/\text{min}$, 当样品高度为 10cm 时可达 0.0166s^{-1} 。现实中机械的施工装置的作用速度区间为 $1 \sim 8\text{m}/\text{s}$, 对于高度为 10cm 的样品为 $10 \sim 80\text{s}^{-1}$ 。利用不同机械的研究令变形速度具有宽泛的变化区间: 从液压和机械压力机到打桩机, 实际上复制和取得相同条件下的强度指标与加荷速度之间的依存关系是不可能的。

在温度为 -20°C 的情况下用粗颗粒砂和黏土, 相应含水率为 15% 和 30% 制备的尺寸为 $10\text{cm} \times 10\text{cm} \times 10\text{cm}$ 的冻土土样进行实验, 其结果显示, 对于黏土变形速度区间为 $0.003 \sim 0.015\text{s}^{-1}$, 对于砂为 $0.005 \sim 0.013\text{s}^{-1}$ 时, 瞬时压缩强度 (土体模型为弹-黏塑性体) 与固定参数: 比例界限和黏性之间可能呈线性关系。发现在特定的变形速率区间内黏土线性区段与横坐标间的倾角要大于砂。这也就证明了黏土动态黏性更高, 其值为 $4 \times 10^8 \text{N} \cdot \text{s}/\text{m}^2$, 几乎是砂的 1.35 倍。变形速度增大到 0.2s^{-1} (将近 12 倍) 时, 黏土动态黏性降低了 $1/16 \sim 1/18$, 砂则降低了 $1/14 \sim 1/15$ 。砂岩的动态黏性为 $1.7 \times 10^{11} \text{N} \cdot \text{s}/\text{m}^2$, 密实泥灰岩为 $3.2 \times 10^{12} \text{N} \cdot \text{s}/\text{m}^2$ 。

因为在建立冻土强度数据表时缺少施加荷载速度的标准, 并考虑到机械系列实验的技术可能性, 笔者认为, 样品的变形速度应为 0.01s^{-1} 。获得的不同单元变形下的临时阻抗值可以命名为瞬时强度。

在样品瞬时加荷条件下, 破坏过程将以极快的速度完成 (冻土中的裂隙增长速度为声波传播速度的 $30\% \sim 40\%$)。由于这个原因, 荷载作用下接触点的冰融化过程和随后在低应力区域的水分冻结无法达到稳定, 且不会改变样品温度。

压缩实验条件下样品与压力机平台间的接触条件对样品破坏特点有着实质性的影响^[16,20,11,21,13]。

由于在压力机平台和土样的接触边界上的摩擦力作用, 样品断面上的横向变形衰减, 压缩应力开始在表面边缘集中并由样品底面周线向深处扩展。在变形初期横向变形增大, 之后在荷载作用下样品发生压扁现象并沿与样品轴向夹角为 45° 的斜面方向断裂, 对于立方体土样将形成具有塑性体特点的大致上呈等边角锥体的六个碎块。

在接触表面有润滑剂存在的条件下 (润滑剂可以是在压力作用下接触边界上冰夹层融化所形成的水), 摩擦力下降, 这保证了不同截面条件下与样品高度相比相对均匀的横向变形和较大的法向应力的发展。在这些应力的作用下随着样品中独立垂直柱状体 (该柱状体随后会破坏成更小的碎块) 的形成, 纵向裂缝进一步发育。这样的破坏令冻土表现出脆性体的特点。