

冻土断裂力学及其应用

李洪升 朱元林 著



海洋出版社

国 家 自 然 科 学 基 金 委 员 会
中国科学院寒区旱区环境与工程研究所冻土工程国家重点实验室 资助
大连理工大学工程力学系工业装备结构分析国家重点实验室

冻土断裂力学及其应用

李洪升 朱元林 著

海洋出版社

2002 年 · 北京

内 容 提 要

本书主要讨论冻土的线弹性断裂和脆性破坏问题。在详细论述了冻土脆性破坏条件和特征的基础上,论述了冻土断裂力学特征及变形行为。在满足小范围屈服条件下,介绍了冻土断裂韧度指标(K_{Ic} , K_{IIc} 等)的测试与分析。在细观断裂行为研究的基础上,提出了冻土微裂纹的简化及定量评价与分析,并建立了冻土强度破坏的断裂力学准则。最后详尽地讨论了冻土断裂力学在工程中的应用。

本书可供从事冻土力学及冻土工程方面的科学研究与工程技术人员参考,也可作为相关专业的研究生、本科生的教学参考书。

图书在版编目(CIP)数据

冻土断裂力学及其应用/李洪升,朱元林著. —北京:
海洋出版社, 2002. 1

ISBN 7-5027-5500-4

I. 冻... II. ①李... ②朱... III. 冻土力学:
断裂力学 IV. P642.14

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2002) 第 001069 号

海洋出版社 出版发行

<http://www.oceanpress.com.cn>

(100081 北京市海淀区大慧寺路 8 号)

兰州中科印刷厂印刷 新华书店发行所经销

2002 年 1 月第 1 版 2002 年 1 月兰州第 1 次印刷

开本: 787×1092 1/16 印张: 10.31

字数 238 千字 印数 1~1000

定价: 25.00 元

海洋版图书印、装错误可随时退换

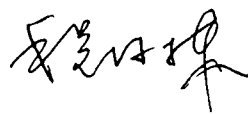
序

我国多年冻土面积达 $2.15 \times 10^6 \text{ km}^2$, 占国土面积的 22.3%, 仅次于俄罗斯和加拿大, 居世界第三位。包括季节冻土在内的中国冻土面积约占全国面积的 75%, 对我国的国民经济建设有很大影响。同时已查明, 我国高海拔多年冻土面积达 $1.73 \times 10^6 \text{ km}^2$, 占北半球高海拔多年冻土面积的 74.5%, 居世界之最。中国冻土学研究从无到有, 取得了长足的进展, 为今后的进一步发展奠定了基础, 与此同时, 也为我国的寒区工程建设、资源开发、环境保护以及冻害防治作出了重要贡献。近年来冻土研究更进一步注意了冻土区的环境、生态问题及冻土的改造和利用, 并已开始和全球气候变化的研究接轨。当前, 正值我国西部大开发战略的实施, 冻土学的研究势必发挥重要作用。

近 20 年来, 我国冻土力学及冻土工程学的研究得到了飞速的发展。冻土力学基本理论的研究不断深入, 从瞬时至长期, 从一维到三维, 从静态到动态, 从一般冻土到特殊冻土; 研究的领域不断拓宽, 从宏观到细微观, 从损伤到断裂破坏。冻土力学的试验方法和技术不断的更新, 冻土力学的工程应用范围不断扩大, 形成了一支稳定的研究队伍, 并取得了一系列重大的研究进展和创新性成果。冻土断裂力学研究就是在这种大环境下应运而生的, 成为冻土力学的一个新的分支。

本书作者李洪升教授, 朱元林研究员, 从 20 世纪 80 年代末首先开展了冻土断裂力学的研究, 经过 10 多年的不懈努力, 取得了长足进展。将断裂力学理论引入冻土力学研究中来, 从断裂力学理论角度去认识冻土, 研究冻土断裂发生、发展和破坏的机理, 建立全新的冻土破坏准则。《冻土断裂力学及其应用》的出版, 就是其多年研究成果的概括和总结。其中, 建立的广义强度破坏理论, 具有许多独到之处: (a) 把冻胀力考虑为作用于地基基础上的外荷载; (b) 考虑了冻土中客观存在的缺陷, 并简化为裂纹处理; (c) 确定了冻土新的强度指标——冻土断裂韧度。广义强度破坏理论是冻土断裂力学理论上的创新。提出了冻土地基承载力计算的新概念和新方法, 是对传统方法的开拓与创新; 提出了各种地基基础冻害破坏的评价与分析的新观点, 是工程应用上的创新, 是对传统方法的补充、完善与发展。

今后, 需进一步引用其它学科的新理论、新概念和现代先进的研究手段, 积极探索新的研究领域和试验方法, 进一步发展冻土力学理论, 使之成为一门成熟的学科。



2001 年 11 月于兰州

前 言

地球上陆地面积的 25% 为多年冻土。我国多年冻土面积占国土面积的 22.3%，仅次于俄罗斯和加拿大，居世界第三位。包括季节冻土在内的中国冻土面积占全国面积的 75%。冻土作为国土资源、低温环境和建筑材料，它的存在及演变对人类生存环境、生产活动和可持续发展具有重要影响。为了利用和改造冻土，保证冻土区各种工程设施的建设和安全运营，我们必须全面研究和掌握冻土特性、冻土与人类工程活动之间的相互关系以及控制和调整冻土在工程活动影响下发生各种变化的对策。近几年来，随着我国寒区工程建设及人工冻结工程应用的不断发展，我国冻土力学研究取得一系列重大进展和创新性成果。从总体上看，我国冻土力学研究已赶上或接近国际水平，在某些方面已处于国际领先地位。

冻土断裂力学是引用断裂力学理论和方法研究冻土力学行为的一门冻土力学新的分支学科。它的主要研究内容和目标是从断裂力学角度去研究冻土受力过程中断裂的发生、发展和破坏机理，借以建立全新的冻土破坏准则，从而丰富和发展冻土力学理论，并为冻土工程的设计与施工以及冻害的评价与防治提供新的方法与依据。

断裂力学实质上是从事力学角度研究材料中微小缺陷同材料整体质量间的关系的科学。它与一般力学所不同的是，承认材料中含有宏观缺陷（裂缝和裂纹），在远离裂纹尖端的广大区域则仍然假定为均匀连续体。它研究的对象是裂纹尖端局部区域的应力场、位移场和材料的断裂韧度。

Griffith 建立了脆性材料断裂理论，为断裂力学奠定了理论基础。Irwin 从裂纹尖端应力场出发，提出了应力强度因子理论，形成了线弹性断裂力学的构架，并提出了弹塑性材料小范围屈服理论。1973 年 Tada, Paris 和 Irwin 编写的第一本应力强度因子手册，标志着线弹性断裂力学趋于成熟。从此，断裂力学被应用到各种工程结构和材料的断裂安全分析与评定，其应用范围也从金属材料扩大到混凝土、岩石、复合材料及冰体材料等。

冻土是矿物颗粒、冰、未冻水及气体（包括水汽）等多相体复合材料，其中必然存在各种结合面的薄弱点以及结构的极不均匀性，这就隐孕着大量微裂隙和缺陷。所以，冻土本身就是一个“先天”地带有大量微裂缝和各种缺陷的材料。因此，引入断裂力学理论更符合冻土“先天性”的本质。研究冻土断裂力学具有重要的理论意义，可以从断裂力学理论的高度去认识冻土，建立全新的冻土破坏准则，这是对冻土力学基本理论的发展。

冻土，作为一种建筑材料，其基本用途是作为各种工程建筑物的地基，由其承受建筑物荷载。当冻土作为建筑物基础的低温环境条件时，可能引起基础的冻害破坏。因此，冻土断裂力学一方面研究作为地基或低温环境条件的冻土的断裂力学特性及破坏特性和准则，另一方面还把冻土和基础以及上部结构作为一个整体来研究冻害破坏的问题，如研究桩基的冻拔问题和挡墙的稳定性问题等。这就是说，一方面可以依据断裂力学理论提出确定冻土地基承载力的新方法，另一方面可以对寒区工程的冻胀破坏进行评定和分析，为抗冻胀设计以及制定冻害防治措施提供新的理论依据，这就是冻土断裂力学的工程应用价值和意义。

本书共七章，其中第一章绪论，简要介绍了冻土有关概念，如冻胀量、冻胀力以及

冻胀基本理论,还概述了冻土力学研究的现状和发展趋势。第二、三章是全书的基础知识。第二章是断裂力学的基础知识,重点叙述了线弹性断裂理论及 K 准则,并简要介绍了弹塑性断裂理论。第三章是冻土断裂力学的基础知识,主要概述了冻土强度特性的主要研究成果,并着重讨论了冻土断裂力学适用条件及断裂准则。第四、五章在讨论冻土脆性破坏特征及线弹性断裂条件适用性的基础上,着重介绍了冻土断裂韧性 K_{Ic} (I 型裂纹)、 K_{IIc} (II 型裂纹)、界面 $K_{I/IIc}$ 以及 I + II 复合型断裂的测试研究成果,不仅给出了断裂韧度的定量指标,而且给出了 K_{Ic} 、 K_{IIc} 与温度、含水量及加载速率的定量关系以及 K_{Ic} 的尺寸效应等,还就有关试验方法问题做了较详细的说明。如果说第四、五两章是从宏观上研究冻土断裂韧性,那么第六章就是从细微观角度,研究冻土中微裂纹的发生、发展的演化机制和断裂破坏过程。最后一章就是冻土断裂力学的工程应用,具体指出了如何把实际冻土工程问题简化为断裂力学模型,给出了在评定工程冻害问题时,应用断裂力学的方法和程序,并给出工程实例。

综上所述,本书的主体是讨论冻土的线弹性断裂和脆性破坏问题。本书在详细论述冻土脆性破坏条件和特征的基础上,讨论了冻土断裂韧度指标的测试,建立了冻土强度破坏的断裂力学准则,并较详尽地讨论了冻土断裂力学在工程中的应用。

《冻土断裂力学及其应用》的出版凝聚着许多同仁的心血和汗水。中国科学院兰州分院院长、中国科学院寒区旱区环境与工程研究所所长、冻土工程国家重点实验室主任程国栋院士在百忙之中为本书写了序,更加体现了对这一研究工作的支持和鼓励。冻土工程国家重点实验室前主任吴紫汪研究员是最先支持搞冻土断裂力学课题研究的,并亲临现场指导试验,关注试验的结果,竭力推动这一研究工作的开展。实验室副主任徐学祖研究员、马巍研究员对本项研究的开展也给予了大力支持。冻土工程国家重点实验室参加此项研究工作的还有:何平研究员、张家懿高级实验师、彭万巍高级工程师、蒲毅彬高级工程师、王家澄研究员、常小晓工程师、张建明副研究员、朱国才高级工程师、沈忠言研究员及张顺英、潘凤珍、杨曙光等同志。大连理工大学工程力学系杨海天教授、张小鹏副教授、孙秀堂、李光伟高级工程师、刘维波工程师、平旭高工程师、李仑同志、博士研究生刘增利、李南生、梁承姬等也参加了本项研究工作。特别是刘增利博士参加了全部试验工作,为本书的出版作出了重要贡献。冻土工程国家重点实验室仪器维修组、制冷组的全体同志及其它部门有关同志为本项研究提供了必要的试验条件与保障。

作者对上述指导、支持、关心本书出版和该课题研究的所有领导、专家以及直接参加该项研究工作并为该项研究提供条件的所有同事;对中国科学院寒区旱区环境与工程研究所编辑出版部金炯编审、沈永平先生、孙良英女士、梁红女士、祝国存女士和申巧南女士为本书的出版在编辑、审校、排版、清绘图件中付出的辛勤劳动,在此一并表示最诚挚的谢意。

鉴于冻土断裂力学是刚刚起步的研究课题,又由于作者水平所限,难免有错误和疏漏之处,诚望批评指教。

作 者

2001 年 9 月

FOREWORD

About 25% of the land area on the earth are permafrost. The permafrost area in China occupies 22.3% of its territory, and it ranks the third place in the world, only after Russia and Canada. The total area of frozen ground including permafrost and seasonally frozen ground in China occupies about 75% of its territory. The existence and evolution of frozen ground, as a type of land resources, low temperature environment and construction material, give an important effect on the living environment, productive activities and continuable development of human being. In order to utilize and reform frozen ground so as to ensure the construction and safe operation of various types of engineering facilities in cold regions, we must entirely investigate and understand the properties and features of frozen ground, relationship between frozen ground and engineering activities, and countermeasures for controlling and adjusting the change of frozen ground under the effect of engineering activities. With the rapid development of engineering construction in cold regions and application of artificially ground freezing techniques in recent years, great progress and a series of creative achievements of the research on frozen soil mechanics have been obtained in China. Overall, the research on frozen soil mechanics in China has caught up with or closed to the world level, and in several aspects has reached the advanced world level.

Fracture mechanics of frozen soil is a new branch of frozen soil mechanics, which applies the theory and method of fracture mechanics to investigate the mechanical behaviour of frozen soil. Its main contents and objective of study are to investigate the formation and development of fractures during stressed processes and the mechanism of failure from the view-point of fracture mechanics, and to establish a complete new type of failure criterion of frozen soil, so as to enrich and develop the theory of frozen soil mechanics and to provide new methods and bases for the design and construction of frozen soil engineering and the evaluation and prevention of frost damage.

Fracture mechanics is a branch of science, which substantially investigates the relationship between the micro defects in material and the total mass of the material from the view-point of mechanics. Its main difference from the general mechanics is that it recognizes that there are macro defects (cracks or fissures) in material, and it supposes that in the vast region of the material far from the tip of cracks is still the homogeneous continuity. Its objectives of study are the stress field, displacement field and fracture toughness of material in the limited region near the tip of a crack.

Griffith established the theory of fracture for brittle material, setting up the theoretical basis of fracture mechanics. Irwin proposed the theory of stress intensity factor according to the stress field at the tip of cracks, so that constructed the frame of the linear

elastic fracture mechanics, and proposed the theory of small-scale yielding for elastic-plastic material. Tada, Paris and Irwin compiled the first copy of the handbook of stress intensity factor in 1973, which marked the linear elastic fracture mechanics tending to be ripe. Since then, fracture mechanics has been widely used to analyze and evaluate the fracture safety of various types of engineering structures and materials, and the scope of its application also extended from metal to concrete, rock, compound material and ice.

Frozen soil is a multi-phase compound material composed of mineral particle, ice, unfrozen water and air (including vapour), and there must exist lots of weakening points on various kinds of bounding interfaces. Thus, there are plenty of micro cracks and defects in frozen soil. That is to say, frozen soil is a type of material which originally developed various kinds of micro cracks and defects. Therefore, applying the theory of fracture mechanics to frozen soil more confirms to its original nature. It is a great development to the basic theory of frozen soil mechanics from the view-point of the theory of fracture mechanics to recognize frozen soil behaviour and to establish a new criterion of failure for frozen soil. Thus, investigation on fracture mechanics of frozen soil possesses an important theoretical sense.

Frozen soil, as a type of particular construction material, can be used as base or subgrade of various kinds of engineering structures for bearing loads of the structure. Meanwhile, frozen soil may cause frost damage of structure when it is used as low temperature environmental condition. On the one hand, therefore, fracture mechanics of frozen soil mainly studies the characteristic of fracture mechanics and the feature and criterion of failure of the frozen soil when it is used as base of a structure or low temperature environmental condition. On the other hand, it also studies the problem of fracture mechanics when taking the frozen soil, foundation and upper structure as a whole system, such as the problems of frost uplift of pile foundation and stability of retaining wall. As a result, we can evaluate and analyze the frost heaving damage of engineering in cold regions by means of the fracture mechanics theory and provide the theoretical bases for designing the countermeasures of anti-frost heaving. This is the engineering application sense of the frozen soil fracture mechanics.

This book includes seven chapters. The first chapter briefly introduces some basic concepts of frozen soil, such as frost heave, frost heaving forces and frost heaving theory, and also introduces the status and prospects of research on frozen soil mechanics. The second and third chapters are the basic knowledge of the book. The second chapter recounts the basic knowledge of fracture mechanics, mainly recounting the theory of linear elastic fracture and the K criterion and briefly introducing the theory of elastic-plastic fracture. The third chapter is the basic knowledge of frozen soil fracture mechanics, briefly introducing the main research achievements of the strength behaviour of frozen soil and mainly discussing the applicable conditions of fracture mechanics and fracture

criterion for frozen soil. On the basis of discussing the characteristic of brittle failure of frozen soil and the applicable condition of linear elastic fracture, chapter 4 and 5 mainly introduce the test results on the various kinds of fracture toughnesses of frozen soil of K_{Ic} , K_{IIc} and K_{IIIc} on interface and the test results of the compound type fracture of type I and II. Not only the values of fracture toughness, but also the relations between K_{Ic} as well as K_{IIc} and temperature, water content as well as loading rate were given in the two chapters. Chapter 4 and 5 also introduced the dimension effect of K_{Ic} and the test methods for fracture toughness of frozen soil. Chapter 6, from the view-point of micro-cosmic, describes the evolution mechanism of micro cracks and the processes of fracture failure of frozen soil. The last chapter, chapter 7 describes the application of frozen soil fracture mechanics to engineering, including how to simplify the frozen soil engineering problem to fracture mechanical model, and the methods and procedure of using fracture mechanics to evaluate the problem of frost damage of engineering. Several typical case histories of the application of frozen soil fracture mechanics are also given in this chapter.

This book mainly describes the problem of linear elastic fracture and brittle failure of frozen soil. On the basis of detailed describing the conditions and characteristic of brittle failure of frozen soil, the authors discussed the testing of fracture toughness of frozen soil, established the fracture-mechanical criterion of strength failure for frozen soil, and in more detail introduced the application of frozen soil fracture mechanics to engineering.

Publishing of this book and research on this subject was supported by the State Key Laboratory of Frozen Soil Engineering (SKLFSE), Cold and Arid Regions Environmental and Engineering Research Institute (CAREERI), Chinese Academy of Sciences (CAS). Particular thanks are given to Chief of SKLFSE, Director of CAREERI and President of the Lanzhou Branch of CAS, Academician Cheng Guodong for his kindly writing of the preface of this book, and to the former Director of SKLFSE, Professor Wu Ziwang for taking long-term and special care of this research subject. Thanks are also given to Deputy Directors of SKLFSE, Professor Xu Xiaozu and Professor Ma Wei for their support to this study.

Many colleagues had taken part in this research work. They are Professor He Ping, Senior Engineers Zhang Jiayi, Pen Wanwei and Pu Yibin, Professor Wang Jiachen, Engineer Chang Xiaoxiao, Associate Professor Zhang Jianming, Senior Engineer Zhu Guocai, Professor Shen Zhongyan and Mrs Zhang Shunying, Pan Fengzhen and Yang Shuguang from SKLFSE; Professor Yang Haitian, Associate Professor Zhang Xiaopeng, Senior Engineers Sun Xiutang and Li Guangwei, Engineers Liu Weibo and Ping Xuegao, Mr. Li Lun and Drs Liu Zengli, Li Nanshen and Liang Chenji from the Department of Engineering Mechanics of Dalian University of Technology. The authors acknowledge all

of them very much. Particular thanks are due to Dr. Liu Zengli for taking part in all of the experiments and for his contribution to publishing of this book.

The authors would like to express their thanks to all colleagues of the Instrument Preparing Group, Refrigeration Group and other groups of SKLFSE for providing the necessary test conditions and all supports; and to the editors of Editorial Department of CAREERI for compiling, composing and drawing original etc.

Writers

September, 2001

目 次

序	(I)
前言	(III)
第一章 绪论	(1)
第一节 土(岩)体冻胀与冻胀理论	(1)
第二节 冻胀位移(冻胀量)和冻胀力	(5)
第三节 冻土力学研究进展	(11)
第四节 冻土断裂力学研究的内容	(18)
第二章 断裂力学基础	(25)
第一节 Griffith 脆断理论	(25)
第二节 应力强度因子理论	(26)
第三节 小范围屈服理论	(30)
第四节 裂纹尖端张开位移	(32)
第五节 J 积分理论	(34)
第三章 冻土断裂力学适用条件及断裂准则	(39)
第一节 冻土的强度特性	(39)
第二节 冻土破坏性质与特征	(47)
第三节 冻土断裂力学适用条件	(48)
第四节 冻土断裂力学准则及 K 表达式	(52)
第五节 冻土中缺陷简化及处理	(56)
第四章 冻土断裂韧度 K_{Ic} 测试理论和试验	(58)
第一节 冰体材料断裂韧度测试方法	(58)
第二节 冻土断裂韧度 K_{Ic} 测试原理和方法	(60)
第三节 K_{Ic} 测试的试样和试验装置	(64)
第四节 K_{Ic} 测试方法和步骤	(66)
第五节 K_{Ic} 测试结果与分析	(67)
第六节 冻土断裂韧度 K_{Ic} 的尺寸效应	(72)
第五章 冻土断裂韧度 K_{Ic} 的测试及复合型断裂问题	(80)
第一节 冻土剪切破坏的断裂力学评定方法	(80)
第二节 冻土 K_{IIc} 测试原理和方法	(81)
第三节 冻土 K_{IIc} 测试结果与分析	(83)
第四节 冻土与基础界面 K'_{IIc} 测试及结果分析	(86)
第五节 复合受力下的断裂破坏问题	(90)
第六章 冻土细观断裂行为和破坏过程	(100)
第一节 冻土微结构变化的特征	(100)
第二节 冻土微裂纹演化机制	(107)

第三节	微裂纹失稳扩展的临界条件·····	(110)
第四节	微裂纹定量评价与分析·····	(112)
第五节	断裂过程的试验研究·····	(114)
第六节	微裂纹损伤区的理论分析·····	(118)
第七章	冻土断裂力学的工程应用·····	(123)
第一节	工程中的冻土断裂力学问题·····	(123)
第二节	冻土地基承载力的断裂力学分析·····	(124)
第三节	桩基础冻拔稳定性评价与分析方法·····	(130)
第四节	挡墙基础强度及稳定性评价方法·····	(136)
第五节	板形基础抗冻胀破坏的断裂力学分析·····	(140)
第六节	冻胀作用对上部结构破坏的断裂力学分析·····	(144)
第七节	冻土地基基础抗冻胀设计·····	(147)
第八节	地基土换填的断裂力学分析·····	(148)

Contents

Preface	(I)
Foreword	(III)
Chapter 1 Introduction	(1)
1.1 Frost heave and frost heaving theory of soil (rock)	(1)
1.2 Frost heaving displacement (frost heaving amount) and frost heaving forces	(5)
1.3 Progress in the research on frozen soil mechanics	(11)
1.4 Research contents of the fracture mechanics of frozen soil	(18)
Chapter 2 Theoretical Bases of Fracture Mechanics	(25)
2.1 Griffith theory of brittle fracture	(25)
2.2 The theory of stress intensity factor	(26)
2.3 The theory of small scale yielding	(30)
2.4 Open displacement at the tip of a crack	(32)
2.5 Jintegral theory	(34)
Chapter 3 Applicable condition of Fracture Mechanics and Fracture Criterion of Frozen Soil	(39)
3.1 Strength behaviour of frozen soil	(39)
3.2 Failure behaviour and characteristic of frozen soil	(47)
3.3 Applicable condition of fracture mechanics of frozen soil	(48)
3.4 Criterion of fracture mechanics of frozen soil and the expression of K	(52)
3.5 Simplification and treatment of fracture in frozen soil	(56)
Chapter 4 Theory and Experiment for Measuring the Fracture Toughness K_{Ic} of Frozen Soil	(58)
4.1 The method for testing the fracture toughness of ice	(58)
4.2 The principle and method for testing the fracture toughness K_{Ic} of frozen soil	(60)
4.3 The devices and sample for testing K_{Ic}	(64)
4.4 Method and procedure of testing K_{Ic}	(66)
4.5 Test results and analysis of K_{Ic}	(67)
4.6 Dimension effect on the fracture toughness K_{Ic} of frozen soil	(72)
Chapter 5 Test of the Fracture Toughness K_{Ic} of Frozen Soil and the Problem of Compound Fracture	(80)

5.1	The evaluating method of fracture mechanics for the shear failure of frozen soil	(80)
5.2	Principle and methods for testing K_{IIc} of frozen soil	(81)
5.3	Test results and analysis on K_{IIc} of frozen soil	(83)
5.4	Testing and analysis on the results of K_{IIc} at the interface of frozen soil and foundation	(86)
5.5	The problem of fracture failure under compound stresses	(90)
Chapter 6 Micro-fracture Behaviour and Failure Processes of Frozen Soil		(100)
6.1	Characteristic of the change in micro-structure of frozen soil	(100)
6.2	Mechanism of evolution of the micro-cracks in frozen soil	(107)
6.3	Critical condition for the unstable extension of micro-cracks of frozen soil	(110)
6.4	Quantitative evaluation and analysis on the micro-cracks in frozen soil	(112)
6.5	Experimental investigation on the fracture processes of frozen soil	(114)
6.6	Theoretical analysis on the micro-cracks of frozen soil	(118)
Chapter 7 Application of Fracture Mechanics of Frozen Soil to Engineering		(123)
7.1	Fracture-mechanical problems of frozen soil in engineering	(123)
7.2	Analysis on the bearing capacity of frozen soil subgrade in terms of fracture mechanism	(124)
7.3	Methods for evaluating and analyzing the stability of frost uplift of pile foundation	(130)
7.4	Fracture-mechanical analysis on the strength of retaining wall foundation and its stability	(136)
7.5	Fracture-mechanical analysis on the anti-frost heave failure of slab foundation	(140)
7.6	Fracture-mechanical analysis on the failure of upper structure due to the action of frost heaving	(144)
7.7	Design of anti-frost heaving for the frozen soil subgrade and foundation	(147)
7.8	Fracture-mechanical analysis on the replacement of frozen soil subgrade	(148)

第一章 绪 论

温度低于 0°C 且含有冰的土和岩石均称为冻土。通常按土处于冻结状态的持续时间来划分冻土：冻结状态的持续时间从几小时到几昼夜者为短期冻土，不到一年者为季节冻土，两年或两年以上者为多年冻土。按冻结条件，冻土又分为共生冻土、后生冻土和多生冻土。冻土是由矿物颗粒、冰、未冻水和气体等组成的多成分和多相复合体。由于冰的胶结程度具有极为重要的作用，因此，还可按含冰量和物理状态划分冻土。按含冰量分为：富冰冻土（含冰量大于 50%），多冰冻土（含冰量为 25~50%），少冰冻土（含冰量小于 25%）；按物理状态分为：坚硬冻土（又称低温冻土）和塑性冻土（又称高温冻土）^[1]。

我国冻土分布极为广阔，多年冻土主要分布于东北大小兴安岭，青藏高原以及西部高山区一天山、阿尔泰山及祁连山等地区；季节冻土遍布于长江以北十多省份，冻结深度超过 0.5 m 的季节冻土区分布见附图。

第一节 土(岩)体冻胀与冻胀理论

一、土(岩)体的冻胀

土(岩)体冻结过程中，土体中的水分冻结成冰，并形成冰透镜体、多晶冰体及冰夹层等形式的冰侵入体，引起了土体颗粒之间的位移，使土体产生不同程度的体积膨胀现象，这就是土体的冻胀。冻胀受土的类型、水分补给条件、含水量、土中盐分、冻结速率以及外压力的制约。按水分补给条件又分封闭型和开敞型两类冻胀。

土体冻胀必备的条件是：① 具有冻胀敏感性的土质；② 具有初始水分和外界水分的供给；③ 适当的冻结环境条件（温度条件等）。由于冻胀是产生建筑物冻害的主要原因之一，因此有必要对影响冻胀的主要因素作简要的说明。

(1) 土质 土质对冻胀的影响关键在于土的颗粒尺度。在季节冻融层内，土中粒径小于 0.05 mm 的土粒按重量比等于或小于总土重的 6% 的土为非冻胀性土，大于总土重 6% 的土为冻胀性土。当粒径为 0.1~0.05 mm 时，土体就会发生冻胀；粒径为 0.05~0.002 mm 时，具有最强的冻胀性；当粒径小于 0.002 mm 后，冻胀性相应地减弱。

(2) 土的含水量 在封闭体系中，土体冻胀性强弱主要取决于土中含水量大小，在开敞系统中，外界水源的补给大大增加土体的冻胀性。通常只有当土中水分超过一定界限时，才会产生冻胀，这个界限含水量称为起始冻胀含水量。干容重为 $1.5\text{ g/cm}^3 \sim 1.6\text{ g/cm}^3$ 时，起始冻胀含水量 W_0 与塑限含水量 W_p 有线性关系^[2]：

$$W_0 = (0.71 \sim 0.86)W_p \quad (1-1)$$

(3) 土的孔隙率和密度 当土体密度较小时，有充分的孔隙空间允许冰体膨胀，而

不致引起土颗粒间有大的位移,因此,土的冻胀性甚微。随土体密度增大,孔隙率降低,饱和度增高,土体冻胀性也增大。当土体密度达到最佳颗粒团聚状态,孔隙率最小,冻胀强度就达到最大值。

(4) 土中温度和冻结速度 土的冻结过程就是土中温度变化过程,冻土中的温度状态随地区及环境条件的差异而变化,人类活动,包括建筑物及环境条件的改变都可能直接影响所在地段(区)的冻土温度状态。在一定的温度条件下,随着冻结速度的变化对冻胀性有明显的影响。影响冻结速度的因素主要有:负气温的绝对值,土冻结时的散热量以及冻土层的热阻值。

(5) 外加荷载 外加荷载的作用引起土体冻结温度降低,使未冻土中水分向冻结锋面迁移量下降。因此,一般规律是随外加荷载的增加,冻胀性下降。或者说外部压力较小情况下,土体在起始冻结温度下就可发生冻胀,而外部压力较大情况下,只有超出原来的起始温度很低时才开始冻胀。

综上所述,影响冻胀的主导因素是土中的热流和水流状况。而土质、土中溶质成分、含量及外界压力则在不同程度上改变冻胀的强度和速度。

冻胀引起的破坏现象相当广泛,无论在季节冻土地区还是具有冻-融层的多年冻土区,均时有发生。例如,路基的冻胀问题越来越为人们所重视,并且已和载重、交通频率等相提并论,在路基的建设和保持方面的投入大大增加。在富冰的路基中,问题更是频频发生,大多是由于冻结过程的不均匀冻胀,或是由于在冰晶融化时使地基失去支撑作用。

二、冻胀理论

在上节简要介绍了冻胀问题的基本概念,概括起来,冻胀现象可以包括如下过程:热交换过程、水迁移过程、冰晶生长和土体变形(冻胀)。下面对冻胀理论做简要叙述,通过早期 Taber^[3](1930)和 Beskow^[4](1935)的实验研究,人们对冻胀过程的理解有了明显进步,然而由于冻胀问题的复杂性,对冻胀的认识还有一定局限性。Gold^[5](1957)、Penner^[6](1959)和 Everett^[7](1961)基于热力学理论等使冻胀问题的理论研究有了新进展。从 20 世纪 60 年代到 80 年代冻胀理论的研究有了长足的进展,最有代表性的基本理论简叙如下:

1. 表面张力(毛细作用)理论^[7~9]

该理论表达了孔隙压力与冰-水界面的表面张力之间的关系,是由 Everett 首先提出来的。其数学表达式为:

$$P_i - P_w = \frac{2\sigma_{iw}}{r_{iw}} \quad (1-2)$$

式中: P_i 为孔隙冰压力; P_w 为孔隙水压力; σ_{iw} 为冰-水界面的表面张力; r_{iw} 为冰-水界面的曲率半径。

由式(1-2)可见,孔隙压力差在克服约束作用的同时有冰晶生成,结果产生冻胀,且

冻胀在最初出现冰晶的面上发生。该理论没有考虑冻结速度、温度和温度梯度的影响,有一定的局限性。

2. 次冻胀理论^[10, 11]

该理论建立了描写二次冻胀模型,描述了冻结锋面上孔隙冰和孔隙水压力与温度等之间的关系。其数学表达式为著名的 Clapeyron 方程:

$$\frac{P_w}{\rho_w} = \frac{P_i}{\rho_i} + \frac{LT}{T_0} \quad (1-3)$$

式中: ρ_i , ρ_w 分别为冰、水密度; L 为融化潜热; T 为温度(K); T_0 为水的冻结温度(273.5K)。

次冻胀理论指出,随着温度的降低,冻结锋面向深部推进,但已冻结土中的未冻水仍具有自由活动性。在冻结锋面后面已形成的冰透镜体,就是靠着这部分未冻水的供给,继续缓慢地扩大,引起冻土体积继续膨胀的现象可称为次冻胀。

3. 吸附力理论

该理论是与毛细理论同时产生的,但由于占主流的毛细理论发展很快而压抑该理论,到 20 世纪 70 年代由于毛细理论与实验不符,吸附理论才发展起来。吸附理论指出在冰透镜体和土颗粒之间的未冻水膜厚度是温度的函数,即未冻水膜厚度与温度保持平衡状态,当平衡态受外部干扰时,在冻土系统内部即产生维持平衡的反作用,如此把冻土吸水速度和温度梯度定量联系起来。因为吸附力理论把吸附力和薄膜水迁移结合起来,又称吸附—薄膜理论。Beskow^[4](1935)提出了该理论,Hoekstra^[12](1966)等人的试验证实了这种理论,Takagi^[13, 14](1978, 1980)最早采用这一理论解释冻胀机理并发展了这一理论。

除了上述三个代表性的冻胀理论以外,还有其它学者提出不同的理论假说,从不同的条件,环境和认识水平说明冻胀的机理。

以上的基本理论虽然有各自的局限,但却对冻胀理论的发展作出了贡献,也为以后的理论发展奠定了基础。

三、水热耦合问题的 Harlan 模型^[15]

Harlan R. L. 1973 年在对冻胀理论进行深入研究的基础上,提出了著名的 Harlan 方程,是对冻胀理论的新发展,为研究由水分迁移引起的冻胀问题拓出一条新途径,具有重要的意义。

Harlan 模型为一温度场和水分场的耦合方程组,该方程组描述了部分冻结土的水热迁移问题。

1. 水分迁移方程

在饱和水和非饱和水的非均质多孔介质中,冻结或融化过程的一维稳定流或非稳定