

Microstructure and Damage Mechanical
Characteristics of Frozen Rock Based on
CT Image Processing

基于CT图像处理的冻结岩石 细观结构及损伤力学特性

杨更社 刘 慧 著



科学出版社

国家自然科学基金项目 (41272340, 50974102)

陕西省科技创新团队 (2014KCT-30)

联合资助

基于 CT 图像处理的冻结岩石 细观结构及损伤力学特性

杨更社 刘 慧 著



科学出版社

北 京

内 容 简 介

本书主要介绍了低温环境下岩石细观结构及损伤力学特性的研究成果。以寒区岩石工程和人工冻结岩石工程为背景,以 CT 扫描实验为研究基础,采用 CT 图像处理技术、损伤理论分析和数值计算相结合的方法,重点从冻结温度、细观结构特征等方面研究了岩石细观损伤扩展规律,对工程常见的砂岩、页岩在冻结作用下热物理力学特性、水冰含量、温度分布规律及损伤扩展机理等方面进行了探讨。

本书可作为土木、水利、能源、岩土力学与工程及工程地质等专业的高年级本科生和研究生的教学参考书,亦可供有关科研和工程技术人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

基于 CT 图像处理的冻结岩石细观结构及损伤力学特性 / 杨更社, 刘慧著. —北京: 科学出版社, 2016. 9

ISBN 978-7-03-049996-7

I. ①基… II. ①杨… ②刘… III. ①岩石结构-岩石分析②岩石力学-冻土力学-岩石分析 IV. ①P58

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2016) 第 227714 号

责任编辑: 王 运 / 责任校对: 何艳萍

责任印制: 张 伟 / 封面设计: 铭轩堂

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>

北京数图印刷有限公司 印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2016 年 9 月第 一 版 开本: 720×1000 1/16

2016 年 9 月第一次印刷 印张: 18 1/4 插页: 12

字数: 370 000

定价: 149.00 元

(如有印装质量问题, 我社负责调换)

前 言

我国寒区面积分布广泛，永久性和季节性冻结岩土区面积约占总面积的 75% 左右，且多集中在西部地区。国家“十三五”发展规划，重点基础设施建设将向西部地区转移，推动加快完善铁路、公路骨架网络、重大水利工程建设，众多长大隧道、地铁、水电站和矿山等相继投入建设。“一带一路”战略规划中也囊括了陕西、内蒙古、新疆、甘肃、青海等众多西部省份的重大工程项目。在这些地区实施的寒区岩土工程、液化天然气和石油气的低温地质储存以及矿井建设中的冻结法施工等工程，都不同程度地存在冻结岩石工程的冻害问题，严重影响寒区岩石工程的安全稳定及正常运行。因此，冻结岩石损伤问题的研究对寒区岩土工程建设、矿井建设和低温液化天然气储气库的设计、施工及稳定运营等具有重要的理论意义。

处于低温环境下的岩石是一种自然损伤材料，赋存于岩石内部裂隙及孔隙中的水分发生相变、冻结，导致物理力学性质不仅与其本身物理构成有关，而且与温度、内部赋存的水、受力状态及细观结构有关。目前，国内外关于冻结岩石物理力学性质及相关理论的研究主要是针对不同行业、不同研究领域具体实际情况开展研究。对冻结岩石的物理力学性质的研究多集中在低温岩石单轴和三轴力学性能的室内试验方面，已有的研究成果涉及冻结岩石的细观结构特性的还不多见；对低温环境下岩石损伤扩展特性的研究多集中在冻融循环条件下，借用冻土力学理论，将冻融工程岩体视为等效多孔介质，从试验层面上研究冻融循环条件下岩石基本性质及冻融损伤破坏特性。鉴于岩石损伤与冻土的区别，已有研究成果对于低温冻结作用下岩石损伤力学性能影响机理揭示不足。事实上，低温作用下岩石冻结损伤主要表现为：冻胀作用下裂隙或孔隙的扩展贯通。因此，这就要求从细观层次，借助先进的实验手段，充分考虑岩石细观结构特性，建立恰当的细观损伤力学模型去研究低温冻结环境下岩石的温度、含水量、损伤力学特性问题，才能有效揭示低温作用下冻结岩石损伤机理。

本书的内容是作者负责的国家自然科学基金项目（41272340，50974102），陕西省科技创新团队（2014KCT-30）的部分研究成果。在此，对国家自然科学基金委员会及陕西省科技厅的资助表示衷心的感谢。

本书包括 10 章,第 1 章是绪论;第 2 章介绍了岩石损伤研究进展及损伤力学基础;第 3 章介绍了岩石细观结构损伤特征、形成机制;第 4 章介绍了数字图像处理理论与技术的基本理论与方法;第 5 章介绍了岩石细观损伤结构的 CT 识别及 CT 分析方法;第 6 章进行了常温压缩荷载作用下岩石损伤力学试验研究,基于图像增强技术对加载过程中岩石损伤、细观结构进行了分析;第 7 章研究了低温冻结岩石细观结构的 CT 识别,基于 CT 数直方图技术、三值化分割技术、边缘检测技术,探讨了低温冻结作用对岩石细观结构损伤的影响规律;第 8 章基于体视学原理分析了冻结岩石细观结构构成,建立了冻结岩石细观结构参数计算公式、水冰含量与温度关系的理论公式,探讨了低温冻结过程中岩石细观结构的损伤变化规律;第 9 章进行了温度-荷载联合作用下岩石宏-细观损伤力学特性研究,依据损伤力学理论、岩石细观力学理论,构建了荷载作用下冻结岩石宏-细观损伤本构模型;第 10 章提出了冻结岩石损伤力学试验的数字图像数值分析方法(DIP-FEM),研究了冻结岩石 CT 图像的三维重建方法,对冻结过程及融化岩石温度场及损伤扩展机理进行了分析。第 1 章、第 5 章由杨更社撰写,其余章节由刘慧撰写。

本书的 CT 实验是在西京医院完成的,实验期间得到了王喜林主任医师的大力支持。王喜林主任医师牺牲了宝贵的休息时间,在实验上给予了重要的指导和建议。西安科技大学建筑与土木工程学院中心实验室陈新年教授级工程师在实验岩样采集、加工、实验材料的准备方面给予了大力的支持,付出了艰苦的劳动,在此一并表示感谢。叶万军教授、奚家米教授、张慧梅教授、申艳军副教授、唐丽云副教授、田俊峰博士、魏尧博士、梁博硕士、屈永龙硕士、王铭硕士、李祖勇硕士、高宇藩硕士等直接参与了项目的研究工作。魏尧博士、李祖勇硕士进行了书稿的校核。

本书的损伤、数字图像处理理论、细观力学理论及国内外研究现状部分介绍了国内外同行的研究成果,文后虽然列出了许多文献,但是难免挂一漏万。在此,对所有被引用内容的作者表示感谢。

需要指出的是低温环境下岩石细观损伤特性的研究仍需大量的实验验证。本书在这一研究方向做了一定的探索,但是,由于作者水平有限,书中难免错误和疏漏,敬请读者批评指正。

作 者

2016 年 6 月

目 录

前言

第1章 绪论	1
参考文献	6
第2章 岩石损伤力学基础	8
2.1 损伤及其分类	8
2.2 损伤力学研究内容及方法	9
2.3 连续介质损伤力学基本理论	12
2.3.1 连续介质损伤力学的热力学基础	12
2.3.2 等效性假说	15
2.3.3 损伤变量与热力学状态变量	18
2.3.4 损伤的测量	20
2.4 损伤演化方程和损伤本构关系	21
2.5 岩石类材料损伤本构模型	22
2.6 岩石损伤理论研究现状	26
2.6.1 常温下岩石损伤理论研究现状	26
2.6.2 低温下岩石损伤力学研究现状	29
参考文献	32
第3章 岩石细观结构损伤	38
3.1 岩石细观损伤研究概述	38
3.2 岩石损伤演化的细观特征	43
3.2.1 细观损伤演化与细观主裂纹的形成方式	43
3.2.2 初始损伤对岩石细观损伤演化的影响	44
3.2.3 岩石的细观主裂纹与分支裂纹特征	45
3.3 岩石初始细观损伤的形式及特点	46
3.3.1 岩石初始细观损伤的主要形式	46
3.3.2 典型岩石初始细观损伤的特点	47

3.4 岩石时效损伤的细观特征	47
3.4.1 反复加载条件下岩石的细观损伤特征	47
3.4.2 蠕变条件下岩石细观损伤	48
3.5 不同组构岩石细观损伤形成机制	48
3.5.1 胶结结构岩石破裂形成机制	48
3.5.2 结晶联结岩石的破裂形成机制	49
3.6 岩石的细观损伤破坏机理	49
3.6.1 岩石加载变形过程中各阶段的细观损伤特征	49
3.6.2 细观贯通性主裂纹的形成与岩石破坏	50
3.6.3 岩石破坏的剪切机理	51
3.6.4 岩石的细观损伤破坏机理	52
3.7 岩石细观损伤破坏分析理论	53
参考文献	56
第4章 数字图像处理理论与技术	60
4.1 数字图像处理技术在岩土工程中的应用概况	60
4.1.1 基于数字图像的岩土体力学性质分析	60
4.1.2 基于数字图像的室内试验测量	63
4.1.3 基于数字图像的现场勘察及地质信息分析	65
4.1.4 岩体结构数字识别	68
4.1.5 隧道掌子面地质分析	69
4.2 数字图像处理基础	71
4.2.1 图像与数字图像	71
4.2.2 图像的灰度值	72
4.2.3 灰度直方图	72
4.3 数字图像处理的目的和内容	73
4.4 数字图像处理的方法	74
4.5 常用数字图像处理技术及原理	76
4.5.1 图像增强技术	76
4.5.2 边缘检测技术	87
4.5.3 图像分割技术	89
4.5.4 图像三维重建技术	96
参考文献	97

第5章 岩石细观损伤结构的 CT 识别	100
5.1 岩石细观结构损伤的检测方法	100
5.1.1 结构分析法	100
5.1.2 性能测试法	102
5.2 岩石细观损伤力学问题的 CT 识别	105
5.2.1 岩石常规加载试验的 CT 损伤检测	106
5.2.2 环境因素条件下岩石细观损伤检测	109
5.2.3 CT 试验结果分析方法及应用现状	110
5.3 CT 扫描技术原理	111
5.3.1 CT 扫描技术的物理原理	111
5.3.2 CT 扫描技术的数学原理	112
5.3.3 CT 图像的形成及特征	113
5.3.4 CT 图像数据的基本公式	114
5.3.5 CT 技术术语的物理解释	116
5.3.6 CT 试验在岩石损伤中的应用范围	118
5.3.7 岩石细观损伤 CT 数与岩石损伤密度	119
5.4 岩土力学 CT 试验过程	122
5.4.1 岩土力学 CT 试验试样	123
5.4.2 岩土力学 CT 试验过程与方法	124
5.5 岩石 CT 试验分析方法	127
5.5.1 CT 试验结果分析流程	127
5.5.2 岩石 CT 图像的信息提取	127
5.5.3 直观的 CT 图像分析法	128
5.5.4 CT 数分析方法	129
5.5.5 统计频率分析方法	130
5.5.6 图像运算处理法	130
5.5.7 CT 图像三维重采样方法	131
参考文献	132
第6章 常温压缩荷载作用下岩石损伤力学试验研究	138
6.1 页岩加载过程的 CT 试验	138
6.2 基于图像增强技术的损伤分析	141
6.2.1 伪彩色增强	141

6.2.2	灰度变换增强	144
6.2.3	图像锐化	151
6.3	加载过程中页岩细观结构的获取	154
6.3.1	阈值分割法	154
6.3.2	边缘检测法	156
6.3.3	压缩荷载下岩石细观结构的损伤分析	161
	参考文献	162
第7章	低温冻结岩石细观结构的 CT 识别	164
7.1	低温冻结作用对岩石细观结构损伤的影响分析	164
7.1.1	低温冻结作用对孔隙岩石的影响	164
7.1.2	低温冻结作用对裂隙岩石的影响	165
7.2	低温饱和冻结岩石 CT 扫描试验	166
7.2.1	试验条件及扫描过程	166
7.2.2	CT 扫描试验结果及分析	170
7.2.3	冻结岩石 CT 图像的特征分析	176
7.3	低温冻结作用对岩石细观结构的损伤分析	178
7.3.1	基于伪彩色增强技术的分析	178
7.3.2	基于 CT 数直方图技术的分析	187
7.3.3	基于三值化分割技术的分析	192
7.3.4	基于边缘检测技术的分析	200
	参考文献	205
第8章	冻结过程中岩石细观结构及水冰含量分析	207
8.1	体视学原理	207
8.1.1	体视学概况	207
8.1.2	体视学基本构成关系	208
8.1.3	冻结岩石细观结构参数计算公式	211
8.2	基于体视学原理的冻结过程岩石细观结构参数定量计算	213
8.2.1	冻结岩石细观结构参数随温度变化情况描述	213
8.2.2	冻结岩石细观结构参数统计及分析	217
8.3	冻结过程岩石内水冰含量理论表达及验证	221
8.3.1	未冻水含量与温度关系的热力学理论	221
8.3.2	水冰含量与温度关系的理论公式	223

8.3.3 基于 CT 扫描试验结果的水冰含量理论分析验证	224
8.3.4 冻结岩石内冰膨胀力与温度关系理论表达式	225
参考文献	227
第 9 章 温度-荷载联合作用下岩石宏-细观损伤力学特性	229
9.1 岩石细观力学理论基础	229
9.2 荷载作用下冻结岩石宏-细观损伤本构模型建立	233
9.2.1 基于细观力学的冻结岩石等效弹性模量	233
9.2.2 单轴压缩荷载作用下冻结岩石损伤本构关系	239
9.2.3 荷载作用下冻结岩石宏-细观损伤本构模型的建立	242
9.3 模型验证	243
9.3.1 荷载作用下冻结岩石损伤变量特性分析	243
9.3.2 荷载作用下冻结岩石损伤本构模型验证	245
参考文献	245
第 10 章 基于数字图像数值分析方法 (DIP-FEM) 的冻结岩石损伤特性 ..	247
10.1 数字图像数值分析法 (DIP-FEM)	247
10.2 冻融页岩温度场分布规律及损伤特性的 DIP-FEM 分析	249
10.2.1 页岩二维细观结构图形几何矢量化	249
10.2.2 基于 DIP-FEM 方法的冻融页岩温度场分布规律探讨	251
10.3 冻结过程中岩石损伤力学特性的 DIP-FEM 分析	261
10.3.1 冻结岩石 CT 图像的三维重建	261
10.3.2 冻结过程中岩石损伤力学特性数值试验	265
10.3.3 冻结过程中岩石温度场分布规律及损伤特性分析	267
10.3.4 冻结岩石冰膨胀力及受荷峰值强度随温度演化规律数 值分析	272
参考文献	275

Contents

Preface	1
Chapter 1 Introduction	6
References	6
Chapter 2 Introduction of damage mechanics	8
2.1 Damage and classifications	8
2.2 Research contents and methods of damage mechanics	9
2.3 Basic theory of continuum damage mechanics	12
2.3.1 Thermodynamic basis of continuum damage mechanics	12
2.3.2 Equivalence hypothesis	15
2.3.3 Thermodynamic state variables and damage variables	18
2.3.4 Measurement of damage	20
2.4 Damage evolution equations and damage constitutive laws	21
2.5 Damage constitutive models of rock-like material	22
2.6 Research status of rock damage theories	26
2.6.1 Rock damage mechanics at room temperature	26
2.6.2 Rock damage mechanics at subzero temperature	29
References	32
Chapter 3 Meso-structural damage of rock	38
3.1 Summary of research on meso-damage of rock	38
3.2 Meso-characteristics of rock damage evolution	43
3.2.1 Meso-damage evolution and the formation mode of meso-cracks	43
3.2.2 Influence of initial damage on meso-damage evolution of rock	44
3.2.3 Characteristics of the main cracks and branch cracks	45
3.3 Forms and characteristics of rock initial damage	46
3.3.1 Main forms of initial meso-damage of rock	46
3.3.2 Characteristics of typical initial damage in rock	47
3.4 Meso-characteristics of time-dependent damage of rock	47

3. 4. 1	Meso-damage characteristics of rock under cyclic loading	47
3. 4. 2	Meso-damage of rock under creep conditions	48
3. 5	Mechanisms of meso-damage in rocks with different fabrics	48
3. 5. 1	Fracture mechanisms of rock with cementation structure	48
3. 5. 2	Fracture mechanisms of rock with crystalline-boned structure	49
3. 6	Meso-damage and failure mechanism of rock	49
3. 6. 1	Meso-damage characteristics of rock at different loading stages	49
3. 6. 2	Formation of the main crack and failure of the rock	50
3. 6. 3	Shear mechanism of rock failure	51
3. 6. 4	Meso-damage and failure mechanism of rock	52
3. 7	Analysis theories of meso-damage and failure in rock	53
References		56
Chapter 4 Theory and technology of digital image processing		60
4. 1	Application of digital image processing technology in geotechnical engineering	60
4. 1. 1	Analysis of mechanical properties of rock and soil based on digital image processing	60
4. 1. 2	Indoor measurement based on digital image technology	63
4. 1. 3	Field investigation and geological information analysis based on digital image technology	65
4. 1. 4	Digital identification of rock mass structure	68
4. 1. 5	Geological analysis of tunnel faces	69
4. 2	Preliminary theories of digital image processing	71
4. 2. 1	Image and digital image	71
4. 2. 2	Gray value of images	72
4. 2. 3	Gray histogram of images	72
4. 3	Contents and aims of digital image processing contents	73
4. 4	Methods of digital image processing	74
4. 5	Common digital image processing technology and principles	76
4. 5. 1	Image enhancement technology	76
4. 5. 2	Edge detection technology	87
4. 5. 3	Image segmentation technology	89
4. 5. 4	Three dimensional reconstruction technology	96

References	97
------------------	----

Chapter 5 Identification of rock meso-damage structure based on

CT technology

5.1 Detection method of rock meso-structure and damage	100
5.1.1 Structure analysis method	100
5.1.2 Performance testing method	102
5.2 CT identification of mechanical problems of rock meso-damage	105
5.2.1 CT detection of rock damage under conventional loading	106
5.2.2 Detection of rock meso-damage affect by the environmental factors	109
5.2.3 Analytical method and present status of CT test results	110
5.3 Principle of CT scanning technology	111
5.3.1 Physical principles of CT scanning technology	111
5.3.2 Mathematical principle of CT scanning technology	112
5.3.3 Formation and features of CT images	113
5.3.4 The basic formulas of CT image data	114
5.3.5 Physical interpretation of technical terms in CT	116
5.3.6 Application range of CT technology in rock and soil damage testing ...	118
5.3.7 CT values of rock meso-damage and rock damage density	119
5.4 CT test process of rock and soil mechanics	122
5.4.1 CT test sample for rock and soil mechanics	123
5.4.2 Procedure and method for CT test in rock and soil mechanics	124
5.5 Analysis method of CT scanning in rock	127
5.5.1 Analytical process of CT test results	127
5.5.2 Information extraction from CT image of rock	127
5.5.3 Intuitive CT image analysis method	128
5.5.4 Analytical method based on CT value	129
5.5.5 Analytical method based on statistical frequency	130
5.5.6 Analytical method based on CT image processing	130
5.5.7 Three dimensional reconstruction method of CT image	131
References	132

Chapter 6 Experimental study on rock damage mechanics under compression

load at normal temperature

6.1 CT test during shale loading process	138
--	-----

6. 2	Damage analysis based on image enhancement technology	141
6. 2. 1	Pseudo-color enhancement	141
6. 2. 2	Enhancement of gray level transformation	144
6. 2. 3	Image sharpening	151
6. 3	Acquisition of meso-structure of shale under loading	154
6. 3. 1	Threshold segmentation method	154
6. 3. 2	Edge detection method	156
6. 3. 3	Damage analysis of rock meso-structure under compression load	161
References		162
Chapter 7 Recognition of meso-structure of frozen rock based on		
CT technology		
7. 1	Analysis of influence of frost action on rock meso-structure damage	164
7. 1. 1	Influence of frost action on porous rock	164
7. 1. 2	Influence of frost action on fractured rock	165
7. 2	CT scanning test of frozen saturated rock	166
7. 2. 1	Test conditions and scanning process	166
7. 2. 2	CT scanning results and analysis	170
7. 2. 3	Characteristics analysis of CT images of frozen rock	176
7. 3	Analysis of meso-structure damage of rock affected by freezing	178
7. 3. 1	Analysis based on pseudo-color enhancement technology	178
7. 3. 2	Analysis based on CT number histogram technology	187
7. 3. 3	Analysis based on three-valued segmentation technology	192
7. 3. 4	Analysis based on edge detection technology	200
References		205
Chapter 8 Analysis of rock meso-structure and water (ice) content during freezing		
8. 1	Principals of stereology	207
8. 1. 1	Introduction of stereo vision	207
8. 1. 2	Basic composition relation of stereo vision	208
8. 1. 3	Calculation formulas of meso-structure parameters for frozen rock	211
8. 2	Quantitative calculation of meso-structural parameters of rock during freezing based on stereological principals	213

8.2.1	Variation of the meso-structure parameters of frozen rock with change of temperature	213
8.2.2	Statistics analysis of meso-structure parameters of frozen rock	217
8.3	Theoretical analysis and experimental validation of water (ice) content during rock freezing	221
8.3.1	Thermodynamic theory of the relationship between unfrozen water content and temperature	221
8.3.2	Theoretical formula between unfrozen water and ice content and temperature	223
8.3.3	Verification of theoretical analysis on unfrozen water (ice) content based on CT scanning	224
8.3.4	Theoretical formula between frost heaving pressure and temperature	225
References		227
Chapter 9 Macro-meso damage mechanical properties of rock under combined action of temperature and loading		
9.1	Theoretical basis of rock meso-mechanics	229
9.2	Macro-meso damage constitutive model of frozen rock under loading	233
9.2.1	Equivalent elastic modulus of frozen rock based on meso-mechanics	233
9.2.2	Damage constitutive relation of frozen rock under uniaxial compression load	239
9.2.3	Constitutive model of macro-meso damage of frozen rock under loading	242
9.3	Verification of the model	243
9.3.1	Damage variable characteristics of frozen rock under loading	243
9.3.2	Verification of the damage constitutive model of frozen rock	245
under loading		245
References		245
Chapter 10 Damage characteristics of frozen rock based on digital image numerical analysis method (DIP-FEM)		
10.1	Digital image numerical analysis method (DIP-FEM)	247
10.2	Temperature field distribution and damage characteristics of shale subjected to freeze-thaw cycles based on DIP-FEM method	249

Plate

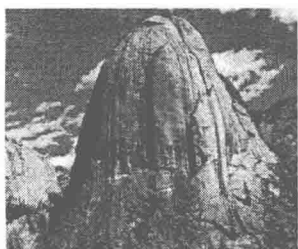
10.2.1	Geometry vector of 2D meso-structure for shale	249
10.2.2	2D temperature field distribution of shale after repeated frost action	
	based on DIP-FEM method	251
10.3	Analysis of damage mechanical properties for shale during freezing	
	by DIP-FEM method	261
10.3.1	Three dimensional reconstruction of CT image of frozen rock	261
10.3.2	Numerical experiment for rock damage during freezing process	265
10.3.3	Temperature field and damage characteristics analysis of rock upon freezing	267
10.3.4	Numerical analysis of evolution law for the ice expansion pressure and the peak strength of frozen rock with temperature change	272
	References	275

第1章 绪 论

据统计,地球上多年冻土、季节冻土和瞬时冻土区的面积约占陆地面积的50%,主要分布在俄罗斯、加拿大、中国和美国的阿拉斯加及北欧等地,其中多年冻土面积占陆地面积的25%。我国永久性冻土和季节性冻土的分布区域占国土面积的75%左右,主要分布在西部和北部^[1-4]。

我国西北、东北等地蕴藏着丰富的能源矿产、土地、森林等宝贵资源,寒区工程建设和资源开发在我国国民经济中占有十分重要的位置。随着我国西部大开发战略以及“一带一路”战略的实施,寒区的道路工程、水利工程、隧道以及工业与民用建设迅速发展。在高海拔、严寒和冰川堆积体等条件下修建隧道及其他交通工程的数量在不断增加。

由低温冻结作用导致的寒区岩石损伤劣化的现象随处可见,如图1.1所示,寒区基础设施建设过程中众多岩土工程不同程度存在冻害问题(图1.2),如:边坡

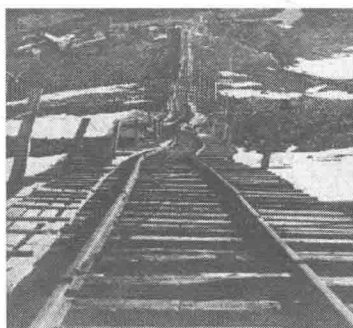


(a)冻融作用崩解的花岗岩山体



(b)冻融作用形成的碎石

图1.1 寒区岩石地貌



(a)铁路路基冻胀变形



(b)输水涵渠的基础冻胀变形破坏

图1.2 寒区岩土工程冻害