



岩土工程损伤力学基础

Damage Mechanics Fundamentals of
Geotechnical Engineering

张我华 王 军 符洪涛 倪俊峰/著



科学出版社



岩土工程损伤力学基础

张我华 王 军 符洪涛 倪俊峰 著



科学出版社

北 京

内 容 简 介

本书讨论了延伸性的岩土工程连续损伤力学基础理论,并提供了与结构分析有限元技术相结合的分析方法。针对岩土工程、水利工程、矿山工程、海洋工程等学科中的结构安全问题,提供了一种新的数值模拟分析、研究手段。此外,本书还以混凝土重力坝、拱坝的抗爆炸冲击荷载的攻击为代表,对地震荷载导致的破坏等重大安全问题的评价与设计,具有重要的参考价值。

本书可供工程力学等相关专业的高校本科生、研究生以及科研人员使用和参考。

图书在版编目(CIP)数据

岩土工程损伤力学基础/张我华等著. —北京:科学出版社, 2018.2

ISBN 978-7-03-056493-1

I. ①岩… II. ①张… III. ①岩土工程-损伤(力学)-研究 IV. ①TU4

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2018) 第 022783 号

责任编辑:刘凤娟/责任校对:杨 然
责任印制:张 伟/封面设计:无极书装

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

*

2018 年 2 月第 一 版 开本:720 × 1000 B5

2018 年 2 月第一次印刷 印张:18 插页:2

字数:350 000

定价:128.00 元

(如有印装质量问题,我社负责调换)

前 言

作者在 Lemaitre 损伤力学理论体系的基础上,提出了广义损伤的观念,将导致材料或结构的力学性能劣化的各种效应统称为损伤。依此观念发展了一套形式统一的、各向同性及各向异性协调的弹性、弹-塑性、黏-弹-塑性损伤模型和损伤材料的本构方程,并建立了其与本构关系相适应的材料性能劣化(损伤发展)的演化方程。指出了在各向异性损伤力学中被广泛采用的对称化处理所引起的缺失和在剪切效应中的谬误,为克服这一不足,发展了一种非对称的各向异性损伤力学模型,结果得到的本构关系和演化方程的形式是对称、完备、正交的,从而克服了非对称性给各向异性损伤力学数学分析造成的困难。

作者根据岩石-岩体内节理、裂隙的尺寸相对于岩体本身的尺寸足够小的地质特征,将岩石-岩体的节理、裂隙等缺陷,唯象地简化处理为岩体的损伤,这样,岩体中的这些不连续缺陷,可以唯象化地描述为岩体中连续的、非均匀分布的缺陷场。因此,分析数学的理论和连续介质力学的基本分析手段,便在岩石-岩体的损伤(缺陷)问题中发挥了极其优越的作用。由此形成了本书。

本书通过建立岩石-岩体的损伤模型,计算岩石-岩体的损伤变量或损伤张量,通过岩石-岩体的有效应力、损伤应变等概念,建立岩土材料的各种损伤本构关系,并提出与本构关系相适应的岩土材料性能劣化(损伤发展)的演化方程。将这种岩土工程的连续损伤力学理论基础与结构分析的有限元技术相结合,可以广泛地为岩土工程、水利工程、矿山工程、海洋工程等学科中结构安全问题的研究,提供一种新的数值模拟分析、研究手段。

本书还引入了能代表材料的微观缺陷状态的、双标量参数的广义损伤模型;建立了与广义双参数损伤变量耦合的本构方程;提出了与广义双参数损伤相应的损伤演化模型。将材料渗透特性中有效面积折减率的观念与损伤力学中有效面积折减率的概念相结合,给出了一种裂隙损伤介质的孔隙率演化与损伤演化的关系;对裂隙损伤孔隙介质引入有效渗透系数和有效压力传导系数的定义,由此对裂隙损伤孔隙介质提出了一种新的、完备的、有效渗流的达西(Darcy)定律公式。对岩土材料提出了一种有孔压的莫尔-库仑(Mohr-Coulomb)脆性损伤破坏准则,在其中引入了孔隙压力与损伤共同造成的有效应力和由孔隙水压造成的有效黏聚力及有效内摩擦角的劣化效应,建立了有效剪切强度参数与损伤和孔隙水压耦合的失效破坏过程模型;提出了一种有效黏聚力、有效内摩擦角、有效孔隙率和脆性损伤相互耦合的演化模型,来描述莫尔-库仑材料性能的劣化机理。本书讨论了在由损

伤演化导致材料碎裂过程中岩土介质动力碎裂过程的特征,以及碎裂过程中裂纹聚结、增长、扩展所产生的碎裂效应,来定量地模拟碎裂的分布和碎片的大小;并以此为基础论述了岩土工程材料在冲击荷载的攻击下,发生的侵彻、损伤、碎裂、崩落等现象的机理和数值模拟技术。

本书应用连续损伤力学理论基础,对岩土材料和工程中的一些典型问题与结构的损伤现象,进行了数值分析研究。内容包括:在地震荷载下龙滩碾压式混凝土重力坝与岩基的二维脆性动力损伤有限元分析和二维黏-弹-塑性动力损伤有限元分析;混凝土重力坝和拱坝在爆炸冲击荷载攻击下,三维脆性动力损伤的动位移、动应力和材料性能损伤、劣化、破坏过程的数值模拟分析;拱坝结构系统(混凝土坝体和周围的岩石基础)在地震荷载激励下与库水静压力、动压力共同作用下的非线性动力损伤三维有限元模拟分析。通过这些模拟分析,得出了坝体和岩基内动力损伤破坏过程的三维全部信息,这将为混凝土重力坝、拱坝的抗爆炸冲击荷载的攻击,抗地震荷载的破坏等重大安全问题的评价与设计,提供一些非常有价值的参考。

本书内容的研究和撰写得到了温州大学建筑工程学院的大力支持和赞助,在此谨表衷心的感谢。

张我华

2018年2月

目 录

第 1 章 岩石-岩体损伤力学引论	1
参考文献	4
第 2 章 岩石-岩体损伤力学的概念	6
2.1 损伤力学概念和岩体的损伤	6
2.2 损伤力学有效应力的概念	8
2.3 损伤力学的基本假定	9
2.3.1 应变等效假定	9
2.3.2 余应变能等效假定	10
2.3.3 基于两种假设的损伤变量	12
2.4 岩体的各向异性损伤张量	13
2.4.1 各向异性损伤张量	13
2.4.2 各向异性主损伤变量	16
2.4.3 岩体中损伤变量的确定方法	17
2.5 各向异性主损伤的有效应力模型	18
2.5.1 三维空间模型	18
2.5.2 二维空间模型	21
2.6 各向同性材料的双标量损伤变量理论	24
2.6.1 各向同性材料的双标量损伤变量特征	24
2.6.2 各向同性双标量损伤变量的定义	25
2.6.3 双参数损伤影响张量的特性	30
2.6.4 双参数损伤的应变能释放率	32
2.6.5 双标量损伤变量模型特征的讨论	37
2.6.6 各向同性双参数损伤模型的对比验证	39
2.6.7 双参数损伤变量的可易性-广义双参数损伤模型	43
2.6.8 双标量损伤影响张量的适用条件	47
参考文献	51
第 3 章 岩石-岩体损伤力学的分形研究	55
3.1 岩体损伤特征的分形描述	55
3.2 岩石破裂事件的分形特征	55
3.2.1 岩石破裂事件空间分布的分形特征	55

3.2.2	岩石破裂事件时间分布的分形特征	57
3.2.3	岩石微裂隙损伤演化的分形特征	60
3.3	损伤演化中岩石孔隙体积分维测定及规律	62
3.4	岩石断裂过程的分形行为和分形效应	64
3.4.1	微观断裂与分形	64
3.4.2	动静态分形裂纹扩展	65
3.4.3	岩石节理的分形特征	68
3.5	岩石分形破碎和能量耗散	70
3.5.1	破碎块度分布的分形性质	70
3.5.2	断裂破碎与能量耗散	71
	参考文献	73
第 4 章	岩石-岩体连续损伤力学基础	75
4.1	连续损伤力学的热力学基础	75
4.1.1	热力学第一和第二定律	75
4.1.2	各向异性损伤材料的自由能和耗散不等式	76
4.1.3	各向异性损伤材料的机械耗散势与对偶关系式	77
4.2	岩石的损伤应变能释放率	78
4.3	岩石的弹性损伤力学模型	79
4.3.1	损伤岩石的三维弹性本构模型	79
4.3.2	损伤岩石的二维弹性本构模型	82
4.4	岩石的弹-塑性损伤力学模型	82
4.4.1	非关联流动法则模型	83
4.4.2	各向异性损伤弹-塑性屈服模型	88
4.4.3	各向异性损伤强(弱)化模型	90
4.4.4	损伤耗散与塑性流动势的联合模型	93
4.4.5	损伤结构弹-塑性分析的静态等效	95
4.5	岩石类介质的黏-弹-塑性动力损伤模型	96
4.5.1	岩石类介质的黏-弹-塑性破坏特征	96
4.5.2	黏-弹-塑性动力损伤模型	100
4.5.3	黏-弹-塑性动力损伤有限元算法	104
4.6	岩石的脆性动力损伤力学模型	109
4.6.1	岩石类介质的脆性非线性破坏特征	109
4.6.2	最小耗能原理与各向同性脆性损伤-断裂准则	109
4.6.3	动力损伤发展方程的指数函数模型	111
4.6.4	各向异性脆性损伤速率模型	112

4.6.5 莫尔-库仑脆性损伤模型	112
4.6.6 裂隙损伤孔隙介质的有效渗透特性	121
4.6.7 裂隙损伤孔隙介质渗透特性的讨论	125
4.6.8 损伤结构的阻尼矩阵	128
4.6.9 动力损伤发展方程的时间积分	133

参考文献	139
------------	-----

第 5 章 冲击荷载的侵彻损伤与破碎力学模型

142

5.1 脆性岩石冲击的动力损伤破碎响应行为

142

5.1.1 声波衰减系数与损伤能量的关系	142
----------------------------	-----

5.1.2 冲击破碎损伤演化方程的建模	143
---------------------------	-----

5.1.3 动态本构关系建模	144
----------------------	-----

5.2 脆性岩石冲击动力损伤所致的破碎

144

5.2.1 脆性岩石的碎裂概念	144
-----------------------	-----

5.2.2 损伤演化导致的碎裂	145
-----------------------	-----

5.2.3 碎裂行为的描述	146
---------------------	-----

5.2.4 材料碎裂参数的确定	147
-----------------------	-----

5.3 冲击荷载的侵彻损伤分析

148

5.3.1 侵彻问题引论	149
--------------------	-----

5.3.2 材料的侵彻损伤与破坏	149
------------------------	-----

5.3.3 侵彻损伤过程中材料的本构方程	149
----------------------------	-----

5.3.4 侵彻损伤的基本方程与数值计算技术	150
------------------------------	-----

5.4 脆性岩石冲击动力损伤所致的破碎分析算例

152

5.4.1 数值应用及验证的例子	152
------------------------	-----

5.4.2 脆性岩石由于动力损伤的碎裂分析算例	155
-------------------------------	-----

5.5 有限厚混凝土弹靶的侵彻损伤分析算例

159

5.5.1 计算条件	159
------------------	-----

5.5.2 弹头侵彻的分析算例	159
-----------------------	-----

5.5.3 高速弹头侵彻混凝土模拟算例的结果	161
------------------------------	-----

5.5.4 结论及期望	162
-------------------	-----

参考文献	163
------------	-----

第 6 章 损伤力学理论模型的初步应用

166

6.1 简单结构中的损伤模型验证

166

6.1.1 莫尔-库仑损伤理论模型的实验验证	166
------------------------------	-----

6.1.2 各向异性弹性损伤理论模型的数值分析验证	172
---------------------------------	-----

6.2 损伤局部特征的损伤力学数值分析

174

6.2.1	厚壁筒壁内局部缺陷的损伤力学分析	174
6.2.2	裂纹端部局部损伤的各向异性分析研究	178
6.3	动力损伤演化模型的数值分析	181
6.3.1	结构动力损伤概述	181
6.3.2	损伤简支深梁的动力响应	182
6.3.3	结构动态响应中的损伤演化过程	186
6.4	简单的黏-弹-塑损伤模型验证	194
6.4.1	简单的黏-弹-塑损伤模型验证技术	194
6.4.2	黏-弹-塑损伤与演化特性的讨论	196
	参考文献	200
第 7 章	工程结构的损伤力学分析应用	202
7.1	混凝土大坝的动力损伤与破坏概述	202
7.2	混凝土大坝及岩基的二维脆性动力损伤分析	203
7.2.1	龙滩混凝土重力坝的结构与岩基的地质构造	203
7.2.2	龙滩重力坝与岩基的脆性动力损伤分析	206
7.3	混凝土大坝及岩基的二维黏-弹-塑性动力损伤分析	214
7.3.1	用黏-弹-塑性动力损伤模型分析混凝土重力坝的意义	214
7.3.2	计算参数及分析网格模型	215
7.3.3	数值分析结果	216
7.4	混凝土重力坝的安全评估	222
7.4.1	混凝土大坝抗震安全评价的回顾	222
7.4.2	各国现行抗震设防标准的基本框架	224
7.4.3	坝体混凝土材料动力特性的评估	226
7.4.4	对混凝土大坝抗震安全评价的几点看法和建议	227
7.4.5	小结	229
7.5	爆炸荷载作用下重力坝三维脆性动力损伤分析	230
7.5.1	三维重力坝分析概述	230
7.5.2	堤坝系统三维脆性动力损伤的数学分析模型	230
7.5.3	爆炸荷载下重力坝的三维脆性动力损伤分析	234
7.5.4	三维脆性动力损伤的模拟结果	235
7.6	爆炸冲击荷载下拱坝脆性动力损伤分析	240
7.6.1	拱坝抗爆安全的概述	240
7.6.2	分析对象的初始损伤张量估计	241
7.6.3	拱坝脆性动力损伤的三维数值模拟的模型	241
7.6.4	拱坝脆性动力损伤结果分析	243

7.6.5 结果讨论246

7.7 地震作用下混凝土拱坝脆性动力损伤有限元分析 247

7.7.1 拱坝抗震安全的概述 247

7.7.2 拱坝系统地震损伤的三维有限元分析模型 247

7.7.3 模拟计算结果与分析 249

7.7.4 结果讨论253

7.8 拱坝在地震中组合荷载作用下动力损伤的分析 253

7.8.1 拱坝在地震中的客观研究 253

7.8.2 由地震引起拱坝损伤机理的动力诠释255

7.8.3 混凝土材料本构关系中的动力损伤行为257

7.8.4 动力方程的时间积分算法 262

7.8.5 计算机算法实现 263

7.8.6 地震中拱坝复杂荷载响应的数值结果265

参考文献273

第1章 岩石-岩体损伤力学引论

各种材料或构件,其内部或表面都存在着由各种原因产生的微小的缺陷(指小于1mm的裂纹或空隙),微缺陷的存在与扩展是材料或构件强度参数、使用寿命等指标降低的原因(图1-1),这些导致材料或结构力学性能劣化的微观结构的变化被称为损伤^[1]。也就是说,在材料或结构受载变形宏观裂纹出现之前,损伤早已对材料或结构的力学性质和寿命产生了影响,这和工程岩体普遍带有节理、裂隙承受荷载的情况十分相似^[2]。在岩体内的节理、裂隙的尺寸相对于岩体的尺寸相当小的情况下,可将节理裂隙理想地简化为岩体的损伤,通过研究岩体的损伤模型来确定岩体强度,进行工程岩体的稳定性分析^[3]。

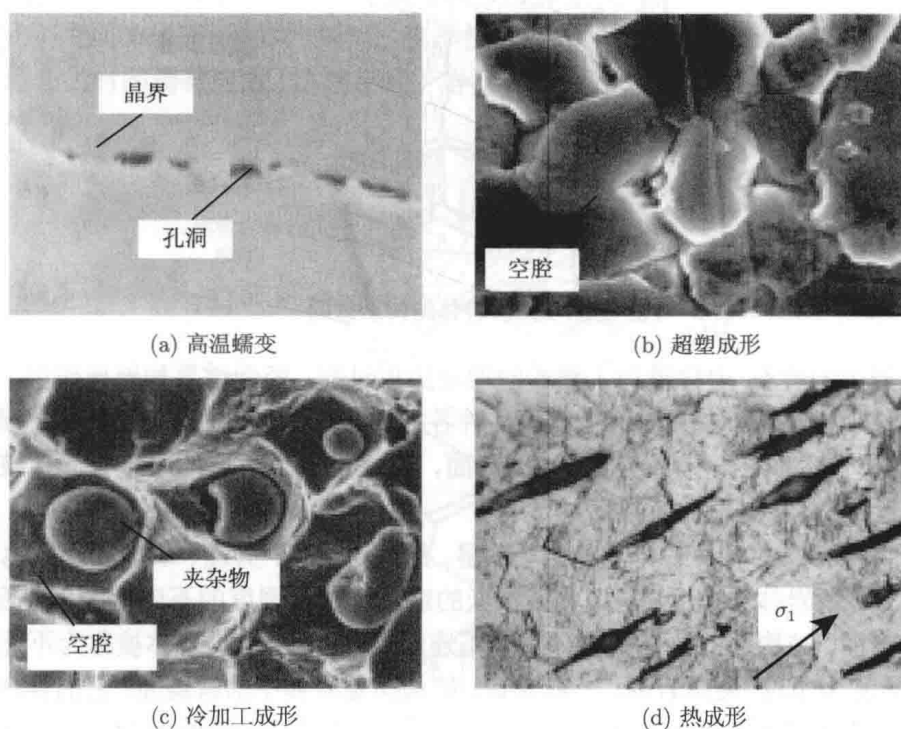


图 1-1 损伤^[1]

损伤理论用固体力学的方法研究受损材料的宏观力学性能,这和经典的固体力学理论研究无损材料的力学性能,在研究对象上有所区别。同时,在研究内容上与断裂力学有所不同,断裂力学主要是研究裂纹端部的应力、位移和能量释放率,

以建立宏观裂纹的断裂判据,它没有涉及宏观裂纹出现以前微裂隙或缺陷对材料力学性能的影响;损伤理论研究材料的损伤演变规律和破坏机理,建立受损材料的本构方程,使计算结果更符合实际情况。

岩石-岩体由于地壳的运动而天然地赋存内应力,以后又经历多次地质构造运动,应力场变得复杂化,而且破坏了岩体的完整性和连续性,产生了许多裂隙、节理和断层。岩体就是由许多这样的结构面和被其切割的最小岩块集合组成的岩体结构^[4](图1-2)。所有的岩石,都有其构造和结构上的特点。岩体中的裂隙、节理、断层、层理等都被称为地质上的结构面。岩石-岩体的力学性质就是岩体结构的力学性质的综合反映。人们习惯上将具有这种结构特征的岩体形象地称为节理岩体,它们更符合受损材料的实际情况。

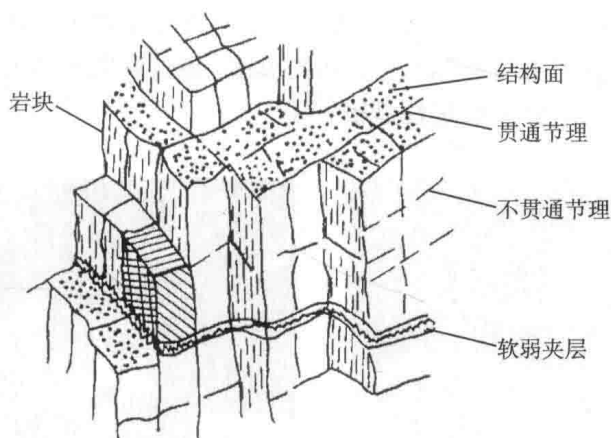


图 1-2 岩石-岩体结构示意图^[4]

地壳中的岩石-岩体经历了漫长的地质历史过程,经受过各种地质作用,在地应力的长期作用下,在其内部保留了各种各样的永久变形的现象和地质构造形迹,使地质体内部存在着各种各样的地质界面,也就是如上所述的不整合、褶皱、断层、层理、片理、劈理和节理等。

岩体内存在的各种各样的褶皱、断层、层理、片理、劈理、节理和裂隙也称为结构面。所谓岩体结构面,是指具有极低的或没有抗拉强度的不连续面,包括一切地质分离面。结构面的存在使岩体具有不连续性,因而,这类岩体被称为不连续岩体,也被称为节理-裂隙岩体。一般来说,结构面是岩体中的软弱面,它的存在增加了岩体中应力分布及受力变形的复杂性,同时,还降低了岩体的力学强度和稳定性能。对岩体的强度和稳定性能起作用的不仅是岩石材料本身,还是岩石块与结构面的综合体,且在大多数情况下,结构面所起的作用更大。许多工程实践表明,在某些岩石强度很高的洞室工程、岩基或岩坡工程中,发生大规模的变形破坏,甚至崩塌、滑坡,分析其原因,不是岩石强度不够,而是岩体的整体强度不够,岩体中结

构面的存在将极大地削弱岩体整体的强度，导致工程结构的稳定性降低。

岩体中的节理和裂隙本身有的是连续贯通的，也有不连续间断的。但不连续间断的在适当条件下，如长期风化、温度或应力变化等，又有可能变成连续贯通的。在许多实际工程中，往往由于节理裂隙形成了连续的破裂面。一旦被黏土矿物充填或挤压破碎之后，则有可能形成力学性能最差的软弱夹层或破碎带，这成为工程稳定性的关键，也是岩石力学研究的重点。

岩石在岩浆形成的过程中，受高温高压的作用，矿物颗粒内部产生内应力，而颗粒的不均匀和晶体之间存在一定的摩擦力，往往导致颗粒内部和颗粒之间出现缺陷或裂纹，在颗粒的边界或沿裂纹处，又易产生滑移或位错。因此，就岩石材料本身来讨论，它是由许多造岩矿物晶体颗粒组成的集合体。在这些颗粒内部和颗粒与颗粒之间的边界上，又贯穿了许多微观的裂隙，而其边界层的强度，随着胶结物材料的不同，其力学性质也有所不同，因此很容易产生错动 [4,5]。颗粒内部也会有错动，叫做裂纹。在裂纹尖端由应力集中引起的错动称为位错 (图 1-3)，但是这种形变和位错是不协调的，一部分受到阻碍，造成应力积聚仍处于平衡状态，形成封闭应力，表现为岩石-岩体的弹塑性变形性质；另一部分即便产生形变或位错，也需要较长的时间调整应力，这就反映了岩石具有流变的性质。因此，岩石也是一种流变体。

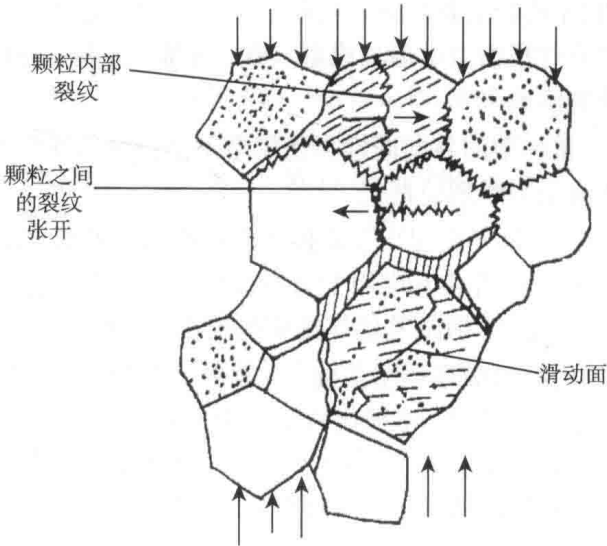


图 1-3 岩石颗粒内的裂纹和位错 [4]

岩石-岩体中存在的这种褶皱、断层、层理、片理、劈理、节理和裂隙等结构面，其相对于实际岩体工程的尺寸，可以当作足够小的缺陷来处理。这样一来，岩体中的这些不连续的缺陷，可以唯象化地处理为岩体中非均匀分布的缺陷场。因为

缺陷的统计尺寸相对于岩体工程的尺寸足够小,因此岩体中的这种非均匀分布的缺陷,可以唯象地用一种连续的损伤场变量来量化描述。因此,分析数学的理论和连续介质力学的基本分析手段,便在岩石-岩体的损伤(缺陷)问题中发挥了极其优越的作用,这便形成了岩石-岩体的连续损伤力学基础。

通过建立岩石-岩体的损伤模型,计算岩石-岩体的损伤变量或损伤张量,确定岩石-岩体的有效应力、损伤应变等参数,从而得到工程岩体的力学性能参数,这是岩石-岩体损伤理论的主要任务。岩石-岩体是经历过多次变形和破坏的地质体的一部分,在地应力的作用下,节理、裂隙的逐渐发育,降低了岩体变形模量和各种强度参数,这种现象可以唯象地描述为损伤发展。因此损伤力学被引入岩石-岩体力学中,以研究岩石-岩体工程的这种劣化性质和过程。

作者在其专著 *Continuum Damage Mechanics and Numerical Application* 中系统地研究了损伤力学基础理论和应用。主要的工作特点有以下几个方面^[3]:

(1) 在 Lemaitre 体系基础上,建立与发展了一套形式统一的、以各向同性及各向异性弹塑性损伤的本构方程与发展方程为模型的损伤力学理论^[3,6]。

(2) 在损伤力学领域内,首先提出并建立了一些关于岩石随机损伤力学的基本概念与问题,提出并验证了随机损伤变量满足的概率分布^[6-8]。

(3) 证明了在各向异性损伤力学中被普遍采用的对有效性张量函数 (effective tensor function, ETF) 进行对称化处理引起的缺失和在剪切效应中的谬误。发展了一种非对称的各向异性损伤力学理论模型,形式对称、完备、正交。克服了非对称性给数学分析造成的困难^[3,6,9,10]。

(4) 给出了双标量参数的各向同性损伤模型下的损伤力学理论,提出了损伤孔隙介质完备有效渗流动力学理论框架^[12-15]。

(5) 和博士研究生团队一起提出了模糊随机损伤力学的基本理论和模糊随机损伤有限元理论与程序^[11],并将其应用于分析各种工程问题中的不确定损伤与损伤发展(如大坝、隧道、边坡、锻锤基础等结构的损伤分析)。

(6) 在现有成熟的材料破坏模型基础上,发展了新的损伤扩展模型,以适应对大多数工程材料的分析与应用。将损伤力学应用于岩土工程问题、水利工程问题、矿山工程问题、海洋工程问题等,在国内外学术专著出版社出版相关的学术专著 5 本;在国内外学术刊物发表相关的学术研究论文 120 多篇。

参 考 文 献

- [1] Tvergaard V. Material failure by void growth to coalescence. *Adv. App. Mech.*, 1990, 27: 83-147.
- [2] Lin J, Liu Y, Dean T A. A review on damage mechanisms, models and calibration meth-

- ods under various deformation conditions. *International Journal of Damage Mechanics*, 2005, 14: 299-319.
- [3] Zhang W H, Cai Y Q. *Continuum Damage Mechanics and Numerical Application*. Berlin-Heidelberg: Springer-Verlag GmbH, 2008.
- [4] 耶格 J C, 库克 N G W. 岩石力学基础. 北京: 科学出版社, 1981.
- [5] 周思孟. 复杂岩体若干岩石力学问题. 北京: 中国水利水电出版社, 1998.
- [6] Zhang W H. *Numerical analysis of continuum damage mechanics*. Sydney: University of New South Wales, Australia, 1992.
- [7] Zhang W H, Valliappan S. Analysis of random anisotropic damage mechanics problems of rock mass, part I-probabilistic simulation. *Int. J. Rock Mech. and Rock Engg.*, 1991, 23: 91-112.
- [8] Zhang W H, Valliappan S. Analysis of random anisotropic damage mechanics problems of rock mass, part II-statistical estimation. *Int. J. Rock Mech. and Rock Engg.*, 1991, 23: 241-259.
- [9] Zhang W H, Valliappan S. Continuum damage mechanics theory and application-part I: theory; part II-application. *Int. J. of Damage Mech.*, 1998, 7: 250-273, 274-297.
- [10] Zhang W H, Chen Y M, Jin Y. Effects of symmetrisation of net-stress tensor in anisotropic damage models. *International Journal of Fracture*, 2001, 106(109): 345-363.
- [11] 张我华, 孙林柱, 王军, 等. 随机损伤力学与模糊随机有限元. 北京: 科学出版社, 2011.
- [12] Tang C Y, Lee W B. Effects of damage on the shear modulus of aluminum alloy 2024T3. *Scripta Metallurgica Et Materialia*, 1995, 32: 1993-1999.
- [13] Tang C Y, Jie M, Shen W, et al. The degradation of elastic properties of aluminum alloy 2024T3 due to strain damage. *Scripta Materialia*, 1998, 38: 231-238.
- [14] 薛新华, 张我华. 岩土渗流损伤力学——理论与数值分析. 成都: 四川大学出版社, 2012.
- [15] 薛新华, 张我华. 双标量损伤模型及其对 Biot 固结的有限元应用. *岩土力学*, 2010, 31(1): 20-26.

第2章 岩石-岩体损伤力学的概念

起初的损伤力学模型是建立在材料内的损伤是各向同性假设的基础上的,测量损伤的变量是标量参数。对于复杂的缺陷及其分布,使用损伤张量来描述是必要的。

在损伤的几何建模中,引入二维和三维模型后清楚地表现出一维标量模型的局限性,直言不讳地讲,仅在球形空腔缺陷和理想的随机微裂纹场的情况下,标量损伤参数才在几何上有意义。因此,在较复杂的情况下,损伤变量必须被考虑为矢量或张量。例如,在各向异性情况下,在材料内的损伤状态必须用一套状态变量-张量函数来描述,这种表示首先是由 Leckie 和 Onate^[1], Cordebois 和 Sidoroff^[2], Murakami 和 Ohno^[3] 等分别提出的。Murakami 和 Ohno 建议了一个有点不同处理的,类似二阶张量表示的损伤,以后其数学上更严密的表达式又被 Betten^[4] 给出。由 Kachanov^[5] 引进的,随后被 Murakami^[6] 所发展的模型,是一个对称的裂缝密度的二阶张量。这个二阶张量模型成功地用于描述金属中的各种损伤,其损伤张量的元素被描述为 6 个独立的函数(元素)。

当损伤发展时,材料可能会变得各向异性,并且损伤也能由 4 阶对称化张量来表示^[2,7,8],它对应于弹性的系数张量,并且包含 21 个独立的元素。这是一种更一般地用 4 阶张量来进行数学表示的损伤张量,它们首先由 Tamuzh 和 Lagsdinsh 建议于文献[9]中。他们用围绕物体考察点的一个单位球面上给定的一套函数,来描述损伤张量元素。

Kawamoto 等^[10,11]提出的二阶张量,是通过测量从母本岩体采样的岩石样本上裂纹的密度、方向与裂缝截面积来确定的。张我华等^[12-14]采用了各向异性主损伤张量,并且在各向异性损伤力学的分析中提出一种直接使用非对称性的各向异性的损伤模型^[12-17],讨论了对称化处理对各向异性损伤效果的影响^[16,17]。

2.1 损伤力学概念和岩体的损伤

一个称为连续损伤力学的新兴力学分支已经引起了很多力学工作者的广泛关注,连续损伤力学系统地研究材料中微观孔洞的增长及其对材料工程性能的影响。在连续损伤力学框架内,这个微观力学,有时要在宏观水平内,以内部状态变量的形式来量化材料缺陷的影响,引入一个损伤张量(Ω_{ij})的概念来定义连续介质的损伤状态。

由于损伤显著地影响结构的安全性能,最近几年力学工作者在这方面进行了大量的研究工作^[17]。Kachanov^[18]首先将与微观缺陷密度相关的连续变量引入材料的损伤中,这些变量随后就体现在材料损伤状态的连续方程中,以便预测微观裂纹的起裂和增长。这个概念已经在热动力学框架内形成,并且热力学式已经在很多现象中识别出材料损伤 (Lemaitre^[19]、Krajcinov 和 Fonseka^[20]、Chaboche^[21,22]),包括损伤和蠕变的耦合 (Murakami 和 Ohno^[23]、Hult^[24]),高周疲劳和蠕变疲劳的相互作用^[25],延性塑性损伤^[26]。

损伤力学和断裂力学的相似之处在于,两者都是为了评估一个结构的安全性和服务年限而研究缺陷介质的状态特性。然而,这两种力学方法在处理这个问题上是完全不同的。在损伤力学中,认为在材料中缺陷存在于微观水平并且是连续分布的损伤材料的物理特性和力学特性依赖于微裂纹的分布^[7,8,12]。在断裂力学中,认为材料中的裂纹是不连续的,在裂纹尖端存在应力集中现象^[13,14],在裂纹尖端附近,应力集中明显高,因此裂纹尖端附近的材料就变得比较脆弱^[18]。

与经典连续力学相比,连续损伤力学有以下的特征:

- (1) 定义了一个适当的损伤变量,来表示材料中微观裂纹的宏观影响。
- (2) 用损伤动力方程 (损伤增长方程) 描述损伤发生后的损伤增长率。
- (3) 用包含损伤变量的损伤连续方程描述损伤材料的力学演化性能。

在实际工程中预测结构的性能,用各向同性损伤的假设一般是足够的。在损伤是各向同性的假设下,由于损伤变量是个标量,所以计算就比较简单,并且等效应变假设对于各向同性模型是有效的^[19]。然而,对于各向异性损伤,损伤变量是个张量,因此模型的确定是比较复杂的。在这种情况下,等效应变假设不能够被满意地应用,需要一个新的研究方法。

对于各向异性损伤,由于有效应力张量的非对称性,用等效弹性能的定義来代替等效应变的概念更合适。研究发现,在大多数的情况下,对称化处理明显地影响结果参数,这可能导致结果失真^[14,19]。因此,各向异性模型中的对称化处理应该谨慎进行^[14,17]。

工程材料的损伤问题已经可以根据连续介质的观点模型化后,成为可用数值计算方法分析的问题,尽管材料的微观结构在一定程度上存在一些非连续特征^[5,17,19]。现有的损伤模型可大致地归纳为以下三类。

唯象论 (纯现象学) 模型^[19,27]。根据一般的思考和拟合试验数据归纳出损伤率。它是根据材料科学模型得到的理论模型,是在统计观念基础上通过唯象处理得到的模型^[28]。

Kawamoto、Ichikawa 和 Kyoya^[10,11]首先把损伤力学的概念引入岩石工程问题,后来 Swoboda 等^[29]成功地把损伤力学的这些概念发展为一个新的开挖隧道方法。在岩体中通常会遇到如开裂的裂缝和缺陷的非连续情况,并且它们明显地影