

滑坡研究中的 力学方法

Mechanical Methods
in Landslide Research

李世海 冯春 周东等/著

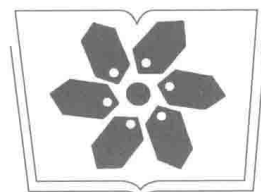


科学出版社

滑模研究中的 力学方法

Mathematische Methoden
im Bereich der Reibung

1996 19 15 20 81 15 00



中国科学院科学出版基金资助出版

滑坡研究中的力学方法

Mechanical Methods in Landslide Research

李世海 冯 春 周 东 等 著

科学出版社

北 京

内 容 简 介

本书作者从事多年滑坡研究,针对滑坡灾害评价、预警中的问题,开展力学方法研究,形成了滑坡灾害评价、预警新的理论体系,并在若干重大工程案例中应用和验证。本书的主要内容包括:滑坡灾害需要解决的工程问题及科学难题,钱学森工程科学思想的核心内容以及基于数值模拟方法的滑坡灾害研究的理论框架;几类地质踏勘的主要目的与力学分析需求之间的关系,量纲分析在滑坡研究中的作用;滑坡研究的基本方程及相应数值方法可描述的问题及适用范围,特别是,将拉格朗日方程应用于连续—非连续介质理论模型;集本构关系与强度准则于一体的新的本构模型——应变强度分布本构模型;适合连续—非连续计算且有更高精度的弹簧元方法及应用;论述并实践了新的裂隙与孔隙渗流耦合计算模型、单元破裂模型、散体碰撞检测算法以及应力场、渗流场、破裂场耦合算法;给出了基于数值模拟与破裂度理论的滑坡灾害评价与预警理论体系,并应用相关理论进行了典型工程案例分析。

本书可以作为力学专业研究生及大学高年级学生以及从事地质灾害研究的研究生的教材,也可以作为土木工程、岩土工程、水电工程、地质灾害工程的软件开发人员、高级工程师、专业技术管理人员的参考书。对于从事地质工程科学与工程技术研究的地质专家、工程专家和力学研究专家也有参考价值。

图书在版编目(CIP)数据

滑坡研究中的力学方法/李世海等著. —北京:科学出版社,2018.3

ISBN 978-7-03-052674-8

I. ①滑… II. ①李… ②冯… ③周… III. ①力学-应用-滑坡-灾害防治
IV. ①P642.22

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2017) 第 096856 号

责任编辑:刘信力/责任校对:张凤琴

责任印制:肖 兴/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>

北京汇瑞嘉合文化发展有限公司印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2018 年 3 月第 一 版 开本:720×1000 1/16

2018 年 3 月第一次印刷 印张:36 3/4

字数:710 000

定价:298.00 元

(如有印装质量问题,我社负责调换)

序

滑坡是一种力学现象。长期以来力学研究工作者对其望而生畏，主要的原因在于山体复杂的结构和其力学特性。

差不多快二十年了，当年李世海博士想开展滑坡研究，征求我的意见。我说这个问题很难，等你退休能做出点眉目就很不错了。通过这本书，让我们看到，他带领的团队坚持下来了，地学界也开始接受了他们，很不容易。这对力学的发展也很有益处，通过滑坡研究将连续介质力学和一般力学联系起来了，提出用连续—非连续介质力学的计算方法模拟滑坡灾害的全过程。

作为方法论，数值模拟与现场监测相结合比较合理，但是过去这种结合难以奏效。现在有了数字通信技术和大规模计算的能力，就有了实现结合的条件。他们早期开发了现场实时监测系统，应用于汶川地震唐家山堰塞湖和三峡库区，也一直坚持开展数值计算方法研究和软件开发，提出了直接将监测结果作为边界条件研究地质体内部的破裂演化，这就将现场观测与数值模拟的结合落到了实处。

连续介质力学中所定义的破坏是指一点的破坏，这对地质体并不合适。书中提出借助数值模拟将地质体的破坏用破裂程度表述的方法，即岩体破裂度表述方法，丰富了岩体力学中关于破坏的认识，也给出了工程师习惯的评价指标。

滑坡灾害预测任重而道远，将工程地质专家的经验量化是力学研究者的使命，希望这本书搭建起地学与力学的桥梁，一方面让地学工作者掌握力学工具，另一方面吸引力学工作者致力于滑坡灾害的研究。随着现代信息技术的发展，力学方法在滑坡乃至地质工程安全领域的应用将会发挥越来越重要的作用，希望广大读者能够从这本书中获得启发。

国家最高科学技术奖获得者

中国科学院院士

中国科学院力学研究所研究员

郑哲敏

2017.11.20

序 二

李世海教授从事滑坡方面的研究工作已有十多年历史。2010 年，我参加了中国科学院力学研究所和著名计算力学家、英国斯旺西大学欧文教授联合举办的学术论坛，让我高兴的是在三维离散介质破裂的计算方法研究方面，李世海教授及其团队取得了令人瞩目的成果。自那时起，我个人对他们的研究工作一直保持关注和兴趣。

滑坡研究是现代岩土力学中一个极具挑战性的领域。我国多年的滑坡灾害防治工作和科学研究虽然积累了大量实践经验和理论成果，但“预测滑坡”仍然是亟待解决的难题。究其原因，主要是滑坡地质体材料及其工程结构的复杂性，以及环境的多样性；因为岩土滑坡存在不连续的断层、节理和天然裂隙、非均匀的材料组分以及多孔多相的耦合特性。从基于刚体极限平衡的传统方法，到基于弹性力学线性和非线性的应力应变模型，发展到基于非连续介质力学的模型和数值计算方法，滑坡的基础理论和方法研究取得了长足的进展。然而上述理论和方法应用于解决工程实践仍有很长的路要走。因此，滑坡问题仍需我们持久、深入的研究和探索。

就滑坡分析方法而言，迄今工程界普遍采用的仍是刚体极限平衡法。由于其概念明确、简便易解，在我国仍是被列入规范并广泛应用于边坡工程的分析评价。另一方面，得益于现代计算技术的迅速发展，数值计算在滑坡研究中应用越来越广泛，主要是以有限元为代表的连续介质力学方法和以离散元为代表的离散介质力学方法，以及由此衍生的连续-离散耦合方法。将连续介质与非连续介质统一为一类数值模型，用以分析滑坡地质体从细观损伤到宏观破坏失稳全过程，是一个未来的发展趋势。关键问题是工程岩体参数的确定，如结构面的几何与力学特性的三维空间分布就是一个很大的难题。在数值模拟方面，主要挑战是高速大容量计算机与高效并行计算技术、快速接触关系检索技术、地质体材料宏细观模型、多相耦合连续非连续介质模型的研发等。

作者多年来从事滑坡问题研究，从理论方法到工程实践研究方面都取得了系列成果。本书阐述的内容突出“地学与力学相结合、现场监测与数值模拟相结合”的基本思想，从滑坡分析的基本理论方法、岩土本构模型、数值方法、现场实验与

监测手段等方面系统介绍了研究团队的创新成果，并介绍了研究团队将模型和方法应用于滑坡灾害研究的工程实例，展望了滑坡力学研究的几个重要发展方向。

我热诚向读者推荐本书，并期望它在岩土工程滑坡的理论研究与工程应用方面起到良好推动作用。

中国科学院院士

清华大学教授

张楚汉
2017.8.25于清华园

前 言

历时五年，终于完成了国家“973 项目——重大工程灾害预警理论及数值模拟方法研究”，这一年刚好是我跟随恩师郑哲敏先生的第三十年，也是研究滑坡问题的第十五年，本书是这些年从事滑坡研究工作的部分总结。郑哲敏先生以身作则，践行钱学森先生工程科学的思想，面对复杂的工程和科学问题，他总是能够以其睿智准确判断、指明方向；他严格要求学生们苦练基本功，做“出汗”的工作；我多年来接受他的教诲，受益匪浅。滑坡灾害研究中面临着很多力学难题，郑先生开始支持滑坡研究时曾说过“等你退休做出点眉目就不错了”。由于本人的力学基础功底不扎实、工程经验不足，距离先生的要求相差甚远。

回顾科研经历，凡是遵循工程科学的思想，以解决工程问题为导向，从基本理论出发，开展工程基本规律研究并力求回答工程问题的研究，工作进展就顺利、成效就明显；过分追求“严格”理论和急于工程应用，就会走弯路。非常规的“冒险行为”与接受工程界“残酷的考验”一直伴随着我们，可以从总结中略见一斑。在我国轰轰烈烈的工程建设和“急迫”交出研究成果的大潮之中，我们深感力不从心。团队历经近 20 年努力工作，真正能够留下来并能持续更长时间发挥作用的只有那些既合理又能回答工程问题的东西。敬请滑坡灾害研究及工程力学研究的众多师长、专家和同仁们对我们的认识、成果予以斧正，也愿相关研究人员、学生借鉴我们的经验与教训。

本书第 1~3 章主要从力学研究的视角认识滑坡灾害的工程问题和有待力学解决的力学难题，表述了本人对钱学森先生工程科学思想的理解与认知。钱学森先生 1948 年首次发表《工程与工程科学》一文，至今对我国工程科学的研究仍然有指导意义，对于推进中国工程技术的创新与发展有现实意义。工程科学是以解决工程问题为目的，基于自然科学的理论，研究和探索工程基本规律的科学。作为应用体会，本书论述了在滑坡灾害研究中应用工程科学的方法，提出了滑坡研究理论框架及滑坡灾害评估预警的理念、研究思路以及技术路线。

以工程为目的、地学为基础、力学为手段开展滑坡灾害研究，确定了地质勘探是滑坡灾害研究非常重要和根本的一环，也是地学与力学相结合的切入点。地质勘探的研究成果怎样用于力学分析？第 4 章简述地质勘探的内容和重要性，抽象了地质工作为力学分析提供的要素以及力学对勘探的需求，特别强调了踏勘的灾变现象对力学分析的检验和对改进力学模型所发挥的重要作用。本章的地质部分是由中国科学院地质与地球物理研究所的李守定研究员撰写的，得到了我的挚友李晓

研究员的指导。在多年的合作中,我向他们学到了很多关于工程地质学的知识。地质学家与力学家如何分工合作?我们探索了一条途径,立足各自学科,彼此欣赏、相互学习、取长补短。

量纲分析是认识工程问题、开展科学研究的重要工具之一。利用量纲分析可以帮助我们思考研究方向、确立研究问题、指导试验、优化数值模拟算法及方案。第5章简要介绍量纲分析中的基本定理和方法,总结近年来在滑坡研究中的思想历程和认识过程。借助量纲分析给出的一些结论,可以改变我们对传统滑坡研究方法的认识。读者可以从中清晰地认识到滑体的滑动、转动是力学分析中共存的问题;渐进破坏是地质体成灾的基本力学过程。

工程科学是架设自然科学与工程技术的桥梁。牛顿第二定律和拉格朗日方程是工程科学在自然科学一端的桥头堡,由此建立的固体力学、流体力学、散体运动微分方程可以作为基本理论。拉格朗日方程或变分原理诠释了数值方法在某种能量表达方式和位移模态下求解方程的方法,本团队提出的连续-非连续介质的计算算法也是拉格朗日方程的一种特殊形式的表达。第6章还简要介绍基于拉格朗日方程的拉格朗日-欧拉代表性单元的计算方法。为了给后面各个章节准备预备知识,本章讨论了有限元、有限差分、离散元的传统做法,并给出与拉格朗日方程变量和积分区域的相关性及适用条件。特别是,也将极限平衡方法纳入拉格朗日方程的表述,从中可以清楚地看到该方法中的理论基础和适用条件。

固体、流体中的本构关系和材料破坏的强度准则是建立复杂介质基本力学方程的重要环节。只有通过实验给出本构关系,才可以建立用于力学分析的拉格朗日基本方程。第7章中介绍我们提出的一种新的本构关系——应变强度分布本构模型(也简称应变强度分布准则)。该模型将拉应变、剪应变的强度准则和应力-应变关系用强度分布函数统一表达。将线性、非线性、软化及断裂的破坏全过程仅由线弹性与断裂两种状态和材料强度分布的基本假设推演获得。目前的研究成果可以适应现有的材料试验给出的各种实验曲线。材料试验观察到的破坏全过程,可借助不同的分布函数表征其不同的破裂模式,揭示了试样由可均匀化的体破坏转化为局部面破坏的物理本质;并提出了代表性单元破裂度的概念,对计算过程中单元断裂前的物理演化过程给出了科学的表述方法。应变强度分布准则的思路起源于认识到莫尔-库仑强度准则中黏聚力项和摩擦项直接相加的不合理性。莫尔-库仑强度准则是应变强度分布准则的一种特殊状态。在可能断裂的破坏面上,莫尔-库仑强度准则是指已断裂面的面积和未断裂面积相等,所以两项前面的系数都是1。应变强度分布准则可以给出代表性体积单元的破裂面积,可以将破裂能以导出量的形式计算出来,增加了对材料破坏的认识。

弹簧元借助于引入泊松弹簧和纯剪弹簧概念,构建了一个特殊的弹簧系统。与球形和类球形颗粒相比,它能够反映复杂的形状,并且在内部具有连续介质的特

性;与有限元方法相比,它是在局部坐标系下讨论问题,不需要复杂的理论推导过程,仅需要具备理论力学和弹性力学的基本知识就可以构建单元;与链网模型相比,它可以表述任意泊松比。弹簧元可以组装成任意复杂形状的复合弹簧单元,也可以方便地构建薄层单元,具有良好的单元内部断裂与单元重构适应性。第8章论述建立该单元的理论推导、不同形式单元的构建方法以及在数值模拟中的应用实例;特别地,借助量纲分析解释了弹簧元在单元畸变条件下仍然有较高的计算精度。

单元在计算过程中的断裂是连续-非连续计算模型的重要组成部分。本研究团队经过十多年的探索,尝试了很多模型,形成了基于三角形、四面体的成熟的计算方法。第9章主要包括两个部分,其一是单元的断裂算法,其中包括单元的一次断裂、二次断裂及逐级断裂,该方法可以得到与一些实验结果或采用复杂本构关系、扩展有限元算法、断裂力学模型等相一致的物理图像;其二是块体的碰撞和运动计算方法,该方法将复杂的块体碰撞过程转变为接触边与目标面的关系判断,根据3种几何关系即可判别三维空间下的6种接触类型,因此借助该方法预测滑坡灾害的风险有很强的实用性。

第10章在介绍孔隙渗流、裂隙渗流基本概念的基础上,全面介绍研究团队近几年在滑坡规律、力学模型、物理模型实验、计算方法等方面的研究成果。三维裂隙渗流和孔隙渗流的计算模型,将压力孔隙渗流的压力节点放在单元内部,补充多个裂隙节点,有效地解决了两种渗流复杂流动的计算问题,也为渗流诱发单元断裂创造了很好的计算模式。应力场、渗流场和断裂场的耦合是地质灾害和各种地下工程规律研究不可回避的问题。有了连续-非连续模型,就可以准确获得断裂场的分布;有了裂隙渗流和孔隙渗流的模型,就可以给出渗流在山体中的压力;利用有效应力和断裂准则,就可以得到渗流场、应力场耦合下的断裂规律。本章介绍渗流场、应力场和断裂场耦合计算模型,给出了水软化强度、裂隙和孔隙水压力的作用以及滑坡体内部渐进破坏多因素影响下的滑坡灾害分析方法。

第11章论述现场监测和室内实验的研究方法。在本书建立的滑坡灾害防治框架中,现场监测十分重要,直接用于灾害的评估和预警。室内实验主要是验证数值模拟的可靠性,这是由地质体的特性决定的。本章主要介绍数字通信技术和光纤技术为滑坡监测带来的变革、地表裂缝和深部滑移与数值模拟的结合,以及柔性加载实验系统与传统材料试验机的差别;并介绍本团队研发的几种实验仪器、装置以及现场监测设备的基本原理及实用情况。

地震诱发滑坡灾害的研究主要是针对我国西南高地地震裂度区高陡边坡的安全问题而开展的。研究期间发生了汶川地震,发生了大量的滑坡次生灾害,造成的损失远大于单纯建筑结构失稳的影响;古滑坡没有在强震作用下复活、大量的斜坡上的“岩溜”以及大型顺层滑坡等现象,直指地震诱发滑坡灾害的力学本质——地

震波的传播、动荷载作用下地质体的灾变。第 12 章基于数值模拟研究地震诱发滑坡灾害的问题。首先说明对于大型滑坡,地震波在滑坡体中的传播不能简单概化为一个动荷载作用于滑坡体产生一致性运动。滑坡尺度和波长相比不可忽略时,现在规范规定的施加地震惯性力用拟静力法模拟很难得到合理的结果;介绍我们发明的一种用爆炸模型试验模拟地震诱发滑坡灾害的方法;作为一种新的尝试,提出了破裂度与永久位移综合判断滑坡稳定性的方法。

第 13 章中全面论述滑坡灾害预测预警的技术框架。首先从理论上提出度量滑坡灾害危险程度的无量纲量——破裂度,介绍破裂度的计算方法、校核过程;并提出基于地表裂缝、位移反分析滑坡内部的破裂状态的数值分析方法。综合前面各章的研究成果,提出以数值模拟为基础的滑坡灾害预测预警的技术框架,其中包含新的评价指标、现场监测和数值模拟结合的计算方法、地质过程预测转化破坏状态判断具体实现、评价体系引入可靠度评价方法等。

第 14 章是本书提出的理论方法在不同层面上的应用,介绍的几个实际案例,基本上都是我国近年来发生的重大灾害或传统方法遇到挑战的技术难题,涉及三峡库区滑坡、武隆鸡尾山滑坡、煤矿露井联采的边坡稳定性分析、以地表入渗诱发的低坡角“流动”性滑坡等。这些例子一方面说明新的理论方法可以解决比较复杂的问题,有较为广泛的适用性;另一方面说明新理论方法的局限性,滑坡灾害的研究任重道远。

本书主要由李世海统一构思、确定研究内容、修改及最后的定稿。其中各章的主要撰写人分别是:李世海(第 1~3 章);李守定、李世海(第 4 章);张青波、李世海(第 5 章);段文杰(第 6 章);周东(第 7 章);张青波(第 8 章);王杰(第 9 章);王理想、王杰(第 10 章);范永波、刘晓宇(第 11 章);冯春(第 12 章);周东、冯春(第 13 章);冯春、王杰等(第 14 章),周东负责全书的整理工作。他们不仅是书稿的撰写人,也是相关研究内容的研究骨干或主要完成人;在本书不断修改的过程中,意识到有诸多问题还需要深入研究、探讨、发展。众人捧柴火焰高,一项能够成形的并且有用的研究成果总是凝结着众多参与研究人员的辛勤劳动,在此一并表示感谢。

在本书完成之际,要特别感谢与我合作多年的同事、学生,这些新的理论模型、思想方法的产生、确认、改进、发展均得益于课题组每周学术会上热烈的讨论甚至激烈的争辩。马照松博士是连续-非连续方法软件实现的总架构师和集成者,他也具备丰富的力学专业知识;冯春博士既是我的学生又是同事,具有很强的快速论证问题和解决问题的能力;刘晓宇博士具有很专业的固体力学知识等,他们对课题组多年研究成果的形成发挥了重要的作用。

特别感谢中国科学院两期方向性项目、两期国家“973 项目”在一起合作、艰苦努力工作的同仁们;在此还要向叶选基先生、方光伟先生致敬,相识近 20 年来,

目睹了他们为我国地质灾害防治事业的奔波、呼吁，忧国忧民、无私奉献的精神，特别是为我国第一个地质灾害“973 项目”立项发挥了积极的推动作用；特别感谢我的妻子王彦改多年来对我工作与生活中的理解、包容与忍耐。

李世海

2014 年 5 月 9 日凌晨于北京

2015 年 8 月 23 日修改

目 录

序一	
序二	
前言	
第 1 章 绪论	1
1.1 滑坡的定义、现象与学科定位	1
1.1.1 滑坡的定义	1
1.1.2 滑坡灾害的基本现象	1
1.1.3 研究滑坡灾害的学科定位	1
1.2 地质体及其力学特性	2
1.3 滑坡体的力学分类	4
1.3.1 滑坡介质的材料特性分类	5
1.3.2 边界条件的分类	7
1.3.3 力学状态分类	8
1.3.4 基本方程的分类	8
1.4 滑坡灾害防治中的工程问题	9
1.4.1 现有地质体稳定性判断方法的适用范围	9
1.4.2 探测地质体力学特性的方法	10
1.4.3 滑坡灾害防治的设计依据	10
1.4.4 水对滑坡的作用及防治措施	11
1.4.5 滑坡灾害风险评估	12
1.5 滑坡灾害防治中的关键力学问题	12
1.5.1 强度理论的局限性	12
1.5.2 固体的渐进破坏过程	14
1.5.3 连续与非连续模型的耦合	15
1.5.4 流体与固体的耦合	15
1.5.5 欧拉与拉格朗日坐标系的耦合	16
1.6 本章小结	16
参考文献	16
第 2 章 滑坡灾害防治的方法论	18
2.1 钱学森的工程科学思想	18

2.1.1	工程科学的定义	18
2.1.2	工程科学的工程性与科学性	19
2.1.3	工程科学的方法论	22
2.2	数值模拟是工程科学的重要组成部分	25
2.3	滑坡研究的方法	26
2.4	滑坡灾害研究的系统性	29
2.5	本章小结	31
	参考文献	31
第 3 章	现阶段滑坡灾害防治的理念与技术框架	32
3.1	滑坡的基本特性	32
3.1.1	滑坡的特殊性	32
3.1.2	滑坡的结构性	33
3.1.3	滑坡的动态演化性	34
3.2	滑坡演化的五个破坏阶段	34
3.3	基于破裂演化原理的工程地质灾害防灾理念	35
3.3.1	理念一: 将地质灾害成灾过程的预测转化为地质体破坏状态的判断	36
3.3.2	理念二: 现场监测和数值模拟相结合, 建立可测物理量与内部破坏状态之间的联系	38
3.4	基于数值模拟的滑坡灾害预警系统技术框架	39
3.5	本章小结	42
第 4 章	滑坡地质勘探方法及与力学分析的相关性	43
4.1	踏勘	43
4.1.1	地形地貌	43
4.1.2	地质构造	45
4.1.3	地层岩性	46
4.1.4	水文地质条件	46
4.1.5	地表地质现象	47
4.2	勘探	50
4.2.1	地层	50
4.2.2	岩体结构	52
4.2.3	地下水	54
4.2.4	岩性试验	56
4.2.5	钻孔取样及土工试验	58
4.2.6	探槽	61
4.2.7	大剪试验	62

4.3 物探	64
4.3.1 地层地震波	64
4.3.2 地质雷达	66
4.3.3 电法	66
4.4 工程地质报告	67
4.5 本章小结	68
参考文献	69
第 5 章 量纲分析方法及在滑坡防治中的应用	70
5.1 量纲分析中的基本概念与定理	70
5.1.1 基本概念	70
5.1.2 Π 定理的表述与理解	71
5.1.3 斜面上的滑块启动与运动	71
5.2 量纲分析的基本方法	76
5.2.1 确定因变量	77
5.2.2 确定自变量	77
5.2.3 选出主参量, 构建无量纲量	78
5.2.4 给出无量纲函数的一般表达式	78
5.2.5 利用量纲分析, 寻求基本规律	78
5.3 量纲分析在滑坡研究中的作用	85
5.3.1 量纲分析用于学科定位	85
5.3.2 明确研究目标及研究内容	87
5.3.3 找出关键问题	87
5.4 量纲分析在其他分析方法中的作用	89
5.4.1 在室内试验中的重要作用	89
5.4.2 量纲分析用于简化基本方程, 抽象合理模型	93
5.4.3 量纲分析在数值分析中的作用	96
5.5 量纲分析在滑坡及防治中的应用案例	102
5.5.1 承压水诱发堆积体滑坡试验	102
5.5.2 地震作用下顺层岩质边坡的破坏	104
5.5.3 应用量纲分析法建立桩间距的计算模型	105
5.6 本章小结	106
第 6 章 描述滑坡灾害体运动规律的基本方程	107
6.1 基于牛顿定律建立的运动方程	107
6.1.1 质点及刚体运动的运动方程	108
6.1.2 固体介质的基本方程	109

6.1.3	流体介质的基本方程	114
6.1.4	流体弹性	116
6.2	基于分析力学建立的运动方程	117
6.2.1	质点-刚体运动的运动方程	118
6.2.2	固体介质的基本方程	119
6.2.3	流体介质的基本方程	120
6.3	基于分析力学的连续-非连续介质力学	122
6.3.1	拉格朗日坐标系	122
6.3.2	欧拉坐标系	122
6.3.3	力学问题与描述之间的关系	122
6.3.4	新的描述方法	123
6.3.5	连续-非连续介质力学	124
6.3.6	拉格朗日方程用于具体数值方法	126
6.4	力学方程表达中的本构关系和强度	126
6.4.1	线性弹性本构关系	127
6.4.2	塑性本构关系	127
6.4.3	莫尔-库仑强度准则	128
6.4.4	基于代表性体积单元的本构关系	129
6.5	滑坡中常用的数值解法	130
6.5.1	有限差分法	130
6.5.2	有限单元法	132
6.5.3	离散元法	135
6.5.4	刚体极限平衡方法	135
6.5.5	融合了离散和连续描述的方法	137
6.5.6	各种方法的适用范围	139
6.6	本章小结	139
	参考文献	140
第 7 章	应变强度分布本构模型的基本理论	142
7.1	地质体的非连续、非均匀特性与两尺度力学模型	143
7.1.1	建立两尺度模型的必要性	143
7.1.2	宏观尺度模型	143
7.1.3	表征元尺度模型	145
7.1.4	两尺度模型与材料本构关系之间的关系	146
7.2	传统的理论本构模型及存在的问题	146
7.3	应变强度分布本构模型的概念和基本假设	147

7.4 界面应变强度分布本构	149
7.4.1 界面力学行为	149
7.4.2 基本概念和假设	149
7.4.3 界面的破裂度与完整度	149
7.4.4 界面拉伸破裂度与完整度	150
7.4.5 界面剪切破裂度	150
7.4.6 界面拉剪联合破裂度	151
7.4.7 几类常用分布下的破裂度和完整度	152
7.4.8 界面拉伸应力-应变关系破裂度和完整度曲线	155
7.4.9 界面拉伸应力-应变关系	156
7.4.10 界面剪切应力-应变关系	158
7.4.11 界面在拉剪联合作用下的应力-应变关系	159
7.4.12 界面在拉剪联合作用下的应力-应变关系	160
7.5 块体应变强度分布本构模型	161
7.5.1 微元体均匀破裂损伤模型	161
7.5.2 正交各向异性损伤模型	164
7.5.3 八面体剪切破裂损伤模型	166
7.5.4 三阶段损伤破裂模型	169
7.6 应变强度分布模型的参数确定方法	176
7.6.1 试验曲线反演分布参数	176
7.6.2 数值模拟与试验数据联合反演分布参数	178
7.7 考虑初始破裂场的应变强度分布模型	180
7.8 本章小结	181
参考文献	181
第 8 章 弹簧元的基本模型与计算方法	184
8.1 弹簧元方法的基本概念与理论基础	185
8.1.1 探索弹簧元方法的技术途径	185
8.1.2 弹簧元方法物理模型及位移模态选取	187
8.1.3 弹簧元方法的理论基础及特点	198
8.1.4 弹簧元单元的构建及标定步骤	205
8.1.5 弹簧元方法的实用性	206
8.2 常应变单元弹簧元模型	206
8.2.1 三节点三角形单元	206
8.2.2 四节点四面体单元	209
8.3 双线性单元弹簧元模型	212