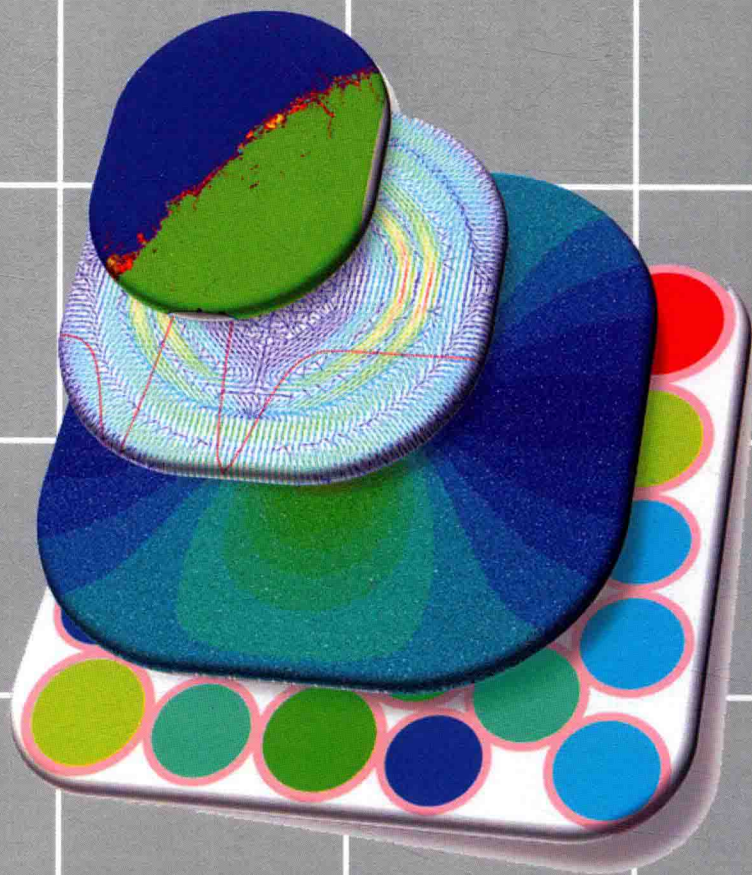


离散元颗粒流 在水利及岩土工程中的应用

宿辉 董卫 胡宝文 屈春来 著



非外借



科学出版社

离散元颗粒流在水利及岩土 工程中的应用

宿 辉 董 卫 胡宝文 屈春来 著



科学出版社

内 容 简 介

离散元颗粒流是研究岩土材料物理力学性能及破坏机理的有效方法,可以从微细观角度解释岩土材料损伤断裂机理,在水利工程领域也开始得到了广泛的重视。本书介绍了作者多年来在水利工程和岩土工程领域有关颗粒离散元分析的研究成果,主要包括:①离散元颗粒的应用基础,包括颗粒离散元模型的尺寸效应分析和细观力学参数反演研究;②离散元颗粒模型建立的方法及应用实例;③离散元颗粒在大尺度工程问题中的应用研究,采用基于连续-离散耦合方法对隧洞围岩变形与破坏机理进行分析;④基于离散元颗粒方法流固耦合分析,包括堤基渗透破坏的离散元模拟分析和地基灌浆加固离散元模拟分析。

本书可作为研究离散元颗粒方法的参考用书,也可供具备一定相关学科基础的水利、岩土工程领域技术人员和相关专业的研究生参考。

图书在版编目(CIP)数据

离散元颗粒流在水利及岩土工程中的应用 / 宿辉等著. —北京: 科学出版社, 2017. 11

ISBN 978-7-03-055050-7

I. ①离… II. ①宿… III. ①水利工程 ②岩土工程 IV. ①TV ②TU4

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2017) 第 266265 号

责任编辑: 焦 健 姜德君 / 责任校对: 李 影

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>

北京厚诚则铭印刷科技有限公司 印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2017 年 11 月第 一 版 开本: 787×1092 1/16

2018 年 4 月第二次印刷 印张: 10 插页: 1

字数: 230 000

定价: 88.00 元

(如有印装质量问题, 我社负责调换)

前 言

水利工程由于其自身的特殊性对地质条件和建筑材料有着很高的要求，岩土材料是人类基础设施最基本的载体和主要的建筑材料，其力学性状和损伤破坏机理的研究一直受到极大关注。随着研究的深入，人们逐渐认识到岩土材料的宏观力学性能受其微细观结构的控制，对岩土材料的研究也从连续介质力学发展到非连续介质的离散力学方法，尤其是离散元颗粒流方法在对岩土材料的细观损伤断裂机理的分析方面显示出巨大的潜力。

随着我国在超高坝、大型硐室群、深埋长隧洞、高边坡等领域建设的不断进展，岩土材料性能研究迎来了新的挑战，离散元颗粒流为此提供了一种新的研究手段。与传统的数值模拟方法不同，离散元颗粒流无法直接给定所需的岩土模型细观参数，需要进行多次尝试并具有一定的盲目性，在很大程度上影响了离散元颗粒流软件的应用与推广。作者多年来一直从事离散元颗粒流在水利工程领域的研究工作，在对颗粒流模型的尺寸效应进行分析的基础上，提出了基于平行黏结模型的细观参数的反演方法，探讨了水利工程不同领域离散元颗粒流模型的建立方法，并对基于连续-离散耦合方法的隧洞围岩稳定、堤基渗透破坏以及地基的灌浆模拟进行了分析和讨论。

本书内容分为两大部分。第一部分：离散元颗粒流的细观参数及模型建立方法研究。此部分重点对离散元颗粒流的颗粒尺寸效应进行分析，探讨岩土材料宏-细观参数间的关系，基于正交试验和中心复合试验设计方法建立了一种细观参数反演方法，给出了标定程序，并对不同细观模型建立方法及应用进行了较为深入的探讨。此部分内容给离散元颗粒流的使用者便捷地建立岩土体细观模型提供了有益的借鉴。第二部分：离散元颗粒流在水利及岩土工程领域的应用。此部分列举了硐室围岩变形、堤基流透破坏以及地基灌浆模三个应用实例，包括连续-离散耦合模拟方法的实现、基于矩张量理论的声发射算法在 PFC 中的应用、基于离散元颗粒流的土体渗透破坏模拟方法、灌浆过程浆液扩散规律分析等内容。此部分内容有助于读者深入领会离散元颗粒流进行数值模拟的难点和技巧，从而提高分析解决具体工程问题的能力。

本书由河北工程大学宿辉、董卫、胡宝文、屈春来合作完成，研究生杨家琦参与了第 2 章及第 3 章部分章节的整理工作，高轩、马辉参与了第 5 章的整理工作，袁周祥参与了第 6 章的整理工作。全书由宿辉统稿。

本书受国家自然科学基金项目（51674013）以及“十三五”国家重点研发计划项目（2017YFC0804609）的资助。

限于作者的学识水平，本书的不足之处在所难免，诚恳希望读者批评指正，联系邮箱为 suh-26@163.com。

作 者

2017 年 9 月

目 录

前言

第1章 绪论	1
1.1 水利工程中材料及结构的力学特性	1
1.2 离散单元法的发展及应用	2
1.2.1 离散单元法的基本思想	2
1.2.2 离散单元法的发展	3
1.2.3 离散元颗粒流的特点	4
1.3 离散单元法在水利工程中的应用	5
1.3.1 离散单元法在堤坝渗透变形方面的应用	5
1.3.2 离散单元法在地层灌浆方面的应用	6
1.3.3 离散单元法在岩爆方面的应用	8
1.3.4 离散单元法在混凝土工程中的应用	8
1.3.5 离散单元法在土力学方面的应用	9
1.4 本书主要内容	10
第2章 颗粒黏结模型细观参数的选取	12
2.1 模型的颗粒尺寸效应研究	12
2.1.1 颗粒尺寸效应的研究方案	13
2.1.2 力学参数的颗粒尺寸效应分析	15
2.1.3 破坏模式的颗粒尺寸效应分析	20
2.1.4 颗粒尺寸的选取建议	23
2.2 宏-细观参数间的关系研究	27
2.2.1 宏-细观参数间关系的研究方案	27
2.2.2 基于正交试验设计的敏感性分析	29
2.2.3 基于中心复合试验设计的响应面构造	33
2.3 细观参数标定程序	38
2.3.1 最优化模型的构造及优化算法的选择	39
2.3.2 细观参数标定程序的实现	40
2.3.3 细观参数标定算例及其讨论	42
2.4 本章小结	46
第3章 颗粒离散元模型的建立与应用	47
3.1 含不规则形状颗粒的材料模型	47
3.1.1 模板构造法	47
3.1.2 颗粒簇图像构造法	50

3.1.3	随机多边形颗粒簇构造法	51
3.1.4	小结	56
3.2	含圆形孔洞的岩石材料	56
3.2.1	试验背景	56
3.2.2	试验设计	57
3.2.3	裂纹演化与声发射特征	59
3.2.4	孔径效应分析	61
3.2.5	小结	63
3.3	泥石流启动过程试验与数值模拟研究	63
3.3.1	工程背景	63
3.3.2	启动实验设计	63
3.3.3	试验过程与结果	64
3.3.4	启动模拟与机理分析	65
3.3.5	小结	68
3.4	本章小结	68
第4章	基于连续-离散耦合的硐室围岩变形与破坏机理	69
4.1	连续-离散耦合模型的映射算法	69
4.1.1	耦合映射算法原理	69
4.1.2	颗粒-节段端点的作用力映射	70
4.1.3	节段端点-颗粒的速率映射	72
4.2	基于矩张量的声发射算法	72
4.2.1	矩张量的提取方法	72
4.2.2	声发射事件的尺度效应	72
4.2.3	矩张量与矩震级的求解	73
4.3	连续-离散耦合模型的建立	74
4.3.1	单向竖向荷载下的渐进变形破裂	75
4.3.2	竖向荷载下的矩震级分布特征	82
4.3.3	不同围压下的破坏特征与矩震级分布特征	88
4.3.4	矩张量分解与不同围压下的破裂类型	93
4.3.5	不同间距下的破坏特征	96
4.4	本章小结	102
第5章	堤基渗透破坏的离散元模拟分析	103
5.1	基于颗粒离散元的流固耦合原理	104
5.1.1	颗粒多孔介质的渗流动力学方程	104
5.1.2	颗粒与流体的相互作用	104
5.1.3	颗粒的运动方程	106
5.2	流固耦合在颗粒流中的应用验证	106
5.2.1	固定粗糙网格法	106

5.2.2 渗流试验验证	107
5.3 堤基渗透破坏过程仿真模拟	110
5.3.1 细观参数标定	110
5.3.2 离散颗粒元渗流模型的建立	112
5.3.3 颗粒离散元模型渗流模拟	113
5.4 渗透破坏数值模拟结果分析	114
5.4.1 颗粒间接触力的变化	114
5.4.2 砂槽中颗粒孔隙率变化	115
5.4.3 流量与水力梯度关系	116
5.4.4 颗粒流失规律	117
5.4.5 砂槽中流场的变化	118
5.4.6 水位上升速度对管涌的影响分析	120
5.5 本章小结	121
第6章 地基灌浆加固离散元模拟分析	122
6.1 颗粒流灌浆模拟基本理论	122
6.1.1 流体域的构建	122
6.1.2 颗粒体的渗透特性	123
6.1.3 流体细观-宏观关系	124
6.1.4 流体的压力效应	125
6.1.5 流固耦合作用的实现	125
6.2 灌浆的颗粒流分析	127
6.2.1 砂砾石地层模型	127
6.2.2 水泥浆液在砂砾石层中的渗透系数	129
6.3 灌浆过程的模拟	130
6.3.1 灌浆模型的边界条件	130
6.3.2 测量圆设置	130
6.4 模拟结果分析	133
6.4.1 灌浆过程分析	133
6.4.2 灌浆压力对灌浆效果影响分析	134
6.4.3 灌浆过程的时间效应	136
6.4.4 灌浆的劈裂效应	136
6.4.5 灌浆过程中孔隙率的变化	138
6.4.6 砂砾层中灌浆的破坏模式分析	139
6.5 本章小结	141
参考文献	143

第1章 绪 论

1.1 水利工程中材料及结构的力学特性

岩土材料所构成的各种工程结构及其地基基础、边坡等是水利、岩土工程等建设领域中的重要组成部分，由于这类准脆性材料自身性能及其所处环境的复杂性的存在，对其力学行为的研究一直是现代计算固体力学中一个极具挑战性的领域（张楚汉，2008）。自19世纪以来，金属材料的力学性能研究取得了巨大的进展，逐渐建立了从弹性力学、塑性力学到断裂力学理论等完善的理论体系，然而这套理论体系在应用到岩土类材料的研究中遇到了严峻的挑战，许多工程问题的解决仍不得不依靠专家的实践经验。与金属材料相比，岩土类材料的物理力学性质更为复杂，具有明显的结构性、时效性、应变软化等特性（蒋明镜等，2015），传统的基于适度均匀化处理的连续介质模型已经很难准确描述其非线性特征。

近年来，随着微（细）观力学研究的不断深入，岩土体宏观物理力学性能主要是受微细观结构的控制的观点得到学界认可（尹小涛等，2010），岩土体微细观结构的多样性和不确定性，使其在宏观尺度上表现出复杂的物理力学性状。传统宏观力学方法建立起来的岩土材料理论模型主要基于唯象理论的方法，通过物理试验现象总结和归纳来得到规律性的结论，对于基本满足连续性、均匀性假设的材料，可以得到较为满意的结果，但对于岩土体则存在变形不连续、应力传递存在结构效应、不遵从连续力学法则等问题，所得结论与实际结果存在较大偏差（Drescher and de Jong, 1972）。物体的宏观变形和破坏是由细观结构的变形累积所造成的，从材料的微细观结构着手去研究微细颗粒间的接触力传递、位移及变形的发展规律，能够更好地从机理上来分析岩土体的非线性及离散特征。

水利工程建设中的常见岩石、土体及混凝土统称为岩土材料，其主要特征是均为颗粒材料堆积、黏结而成的摩擦型集合体材料，如土是由土颗粒堆积而成，混凝土由骨料、水泥石、孔隙等多种介质组成的复合体，而岩石则可视为由矿物颗粒黏结而成，因此岩土材料都是由较小的颗粒按某种特定的排列顺序堆积而成，颗粒间存在或强或弱的黏结，使岩土材料呈现不同的物理力学性能。一般而言，岩土材料颗粒的大小、分布以及颗粒间的黏结都具有随机性（张祺、厚美瑛，2012），而颗粒间也会存在初始的裂隙、孔洞，其数量、尺寸及分布也具有随机性，同时岩土材料在颗粒尺度上具有明显不均匀、非连续特征，在更大的尺度上也具有某种程度上的结构性，其在宏观上表现出高度的非线性特征。

近年来人们对岩土材料及其工程结构的研究和认知开始从连续介质力学发展到非连续介质的离散力学，从宏观力学模型开始延伸到探索微细观力学行为的机理（张楚汉、金峰，2008），以及建立两者之间的等效关系，这得益于现代计算技术水平的迅速提高。以非连续介质力学为特征，以微细观颗粒结构相互作用为基础的颗粒离散元方法在岩土材料

领域的研究中得到迅猛发展和广泛应用。颗粒离散元法最初主要应用于岩体和混凝土力学与工程的研究,着重从细观力学角度解释岩土材料与结构的损伤断裂机理,而后扩展至散粒体材料的分析与研究,目前在岩土工程、矿山开采、材料加工、制药工业、化工以及粮食储存等领域得到广泛的应用,涉及颗粒材料的变形、屈服、流动、破碎以及黏结颗粒材料的动力冲击破坏等过程的研究。随着研究手段的不断发展,扫描电镜(SEM)、X射线断层扫描(X-CT)等方法在岩土材料领域得到深入的探索应用(Bera *et al.*, 2011),从微细观力学角度来分析材料颗粒间的微细损伤变形与材料宏观破坏间的关系,有力推动了颗粒离散元方法在岩土领域的应用。

1.2 离散单元法的发展及应用

1.2.1 离散单元法的基本思想

离散单元法(distinct element method, DEM)(也可简称离散方法)的基本思想起源于分子动力学(molecular dynamics, MD),在20世纪70年代首次由Cundall(1971)提出,主要针对具有不连续性、非均质性、各向异性和非线性的岩体力学性能开展数值模拟研究,其基本思想是把不连续体(如节理岩体)离散为多个刚体单元的集合,每个单元均需满足运动方程,在此基础上采用时步迭代的方法,来求得单元的偏移和接触力,而单元彼此间可以相对滑移乃至分离,不需要满足位移连续和变形协调方程,整个介质的变形和演化由各单元的运动和相互位置来描述,因此非常适合求解大位移和高度非线性问题。

离散元法的基本原理是牛顿第二定律,是将物体离散成一系列能够独立运动、具有一定几何形状和物理力学性能的单元体(王泳嘉,1986)。每个单元体能够平移、转动,单元体间通过预置接触来模拟相互作用,单元体只与相邻的单元体发生作用,单元体间的相对位移是基本变量,其运动受到经典运动方程控制;当某个单元体受到外力或约束作用时,会产生力或力矩的作用,由牛顿第二定律可以求得相关单元体的加速度。通过时间积分则可以得到单元体的速度及位移等参量,通过时步的反复迭代循环,可得到所有单元体任意时刻的加速度、速度、位移及转角等物理量。离散单元间的相互作用是一个以时间为参变量的动态过程,采用时间步长增量的显式有限差分法来计算这一过程。为保证计算的稳定,选取足够小的时间步长,使得在一个时间步长内,单元体间相互作用所产生的扰动不超过其相邻最近的单元体,由此可以从单元体的接触力得到单元体所受合力。整个物理模型的各个单元体间不再强制要求位移连续和变形协调,允许单元体间相互产生大位移和断裂脱离,能够模拟岩体受载后裂缝的出现、扩展直到破坏断裂过程。离散单元法不用再设置复杂的材料本构模型,而只需确定单元体间的接触模型即可,在运行过程中自动生成材料的本构关系,能够表现复杂的非线性本构行为和模拟散粒体、土体及岩石等各种介质的物理力学特性(周健等,2000)。经过多年的发展,离散单元法已经成众多涉及颗粒运动、结构稳定、流体及其耦合等问题的数值模拟平台,已成为过程分析、设计优化和产品研发的一种强有力的工具,在工业领域的应用逐渐成熟,并已从散体力学的研究、岩土工

程和地质工程等工程应用拓展至工业过程与工业产品的设计与研发的领域，并取得了丰硕的成果。

1.2.2 离散单元法的发展

美国的 Cundall 教授在 1971 年，为解决拟静力及动力条件下破碎岩体边坡的稳定问题，首次提出离散单元法的概念。到 1974 年，已编制出二维离散单元程序，并开始对岩石边坡的分析中应用，但由于当时计算机软硬件条件的限制，直至 1979 年才完成较为完善的离散单元法基本程序，通过对颗粒介质的力学行为数值模拟，其结果与 Drescher 和 de Jong (1972) 用光弹技术进行试验所得的结果基本一致，显示了离散元法的先进性。其后，Cundall (1980) 开发块体模型通用程序 UDEC (universal discrete element code)，考虑了岩块的变形性能，并可以根据破坏准则发生断裂。1986 年三维离散元程序 3DEC (3 dimension distinct element code) 开发成功，数据存储结构方式相比 UDEC 有较大改进，此后该方法应用于节理岩体的研究，涉及岩土及采矿领域。Cundall 和 Strack (1979) 合作提出二维圆形单元程序，用于研究颗粒介质的力学行为，其数值模拟的结果与光弹试验的结果较为吻合，从而验证了离散元法的可靠性，为颗粒材料的力学行为的研究又开辟一条新的思路，在此基础上又发展了三维圆球程序 TRUBAL。英国阿斯顿大学的 Thornton 和 Yin (1991) 的研究引入了 TRUBAL 程序，对其进行全面的改造发展，重新命名为 GRANULE 程序，新程序能够完全遵循弹塑性圆球接触力学原理，可以进行干-湿颗粒块的碰撞及破裂规律研究。离散单元法相对于传统连续介质力学方法具有一定的优势，引起了世界众多学者及机构的重视，众多学者进行了大量的探索性研究，极大地促进了离散单元法的发展。

基于离散单元法在实践中的广泛需求，英国的 DEM Solutions 公司开发了世界第一款采用离散单元法模型来模拟和分析颗粒处理和生产操作的通用 CAE 软件 EDEM，用来模拟分析工业粒子的处理和制造过程，为颗粒流的运动、动力、热量和能量传递提供了解决途径，可以结合先进的 CAE 工具来模拟粒子与流体、粒子与结构以及粒子与电磁场的相互作用。

为更好地促进和推广离散元仿真分析的应用，一些离散单元法开源代码软件被开发出来，其中最为著名的是 Yade (Kozicki and Donzé, 2009)。Yade 是一款可扩展的离散单元法开源代码框架，是法国格勒诺布尔大学在 20 世纪 90 年代开发的离散元代码 SDEC 基础上的改进版，采用 Python 和 C++ 作为脚本语言，用户可以非常方便地在此框架上进行二次开发，扩展其功能，在岩土工程领域如岩石破碎、山体滑坡、多尺度的流固耦合、地震破坏分析等问题方面得到广泛应用。

1981 年 Fairhurst、Cundall 等岩石力学界学者创立了 Itasca 公司，开发并完善出了重点应用于解决复杂岩体工程问题的基于不规则块体单元的离散元软件 UDEC 和 3DEC，以及基于圆形/球形单元的离散元颗粒流软件 PFC (particle flow code) 2D/3D。PFC2D/3D 软件采用圆形颗粒来模拟散粒体材料或采用圆形颗粒黏结的方法来模拟固体材料，通过考虑颗粒间及颗粒与边界间的接触作用来模拟各种材料及边界条件，具有邻居单元搜索速度快和

有效模拟变形大等优点，在众多领域内得到了广泛的应用。

首届国际离散元会议于1989年在美国Golden召开，之后每三年召开一次，已分别在美国、澳大利亚、英国召开了六届会议，得益于近年来我国在离散元领域的深入研究和广泛应用，第七届国际离散元会议（DEM7）于2016年在我国大连理工大学召开，来自19个国家和地区的260余名专家学者参与此次会议。Itasca公司连续召开了三届FLAC（fast lagrangian analysis of continua）/DEM国际会议，重点分析展示了离散单元等软件的发展动态及应用成果，同时针对PFC2D/3D颗粒离散元软件分别在德国及日本连续召开了国际会议，这些都极大地促进了离散单元法的发展，也展现出离散单元法在科学研究及工程的实践应用中的强大作用。

我国对离散单元法的研究相对较晚，在1986年召开的第一届全国岩石力学数值计算及模型试验讨论会上，东北工学院（现东北大学）王泳嘉（1986）首次将离散单元法作为节理岩石力学分析的一种新数值方法进行了介绍。随后王泳嘉和邢纪波（1986）对离散单元法在矿山工程中的应用进行了深入研究，并相继推出块体离散元分析系统2D-Block以及三维离散单元法软件TRUDEC，推动了离散单元法在我国岩土工程领域中的应用（王泳嘉、刘连峰，1996）。北京大学刘凯欣等（2003，2004）采用连续体-非连续体模型，应用离散单元法开展了冲击动力学研究，并开发以二维圆盘单元和三维球单元为基础的离散元力学分析系统，对不规则形状弹性体的碰撞问题进行了分析。清华大学孙其诚和王光谦（2008）重点对颗粒物质的物理机制开展深入的研究，从微细观力学角度分析了颗粒接触力链网络与颗粒体系本构关系的关联，初步构建了颗粒物质多尺度力学的研究框架，通过光测力学试验进行了验证，并开发了离散单元数值计算软件THDEM（Tsinghua DEM simulation）。河海大学倪小东等（2009a）较早采用颗粒流软件PFC2D/3D对管涌的发展过程进行数值模拟，采用粗细两种颗粒进行了土体渗透破坏机理研究；同济大学周健等（2000）采用PFC2D/3D开展了土体的应力-应变关系研究，并对剪切带的形成过程进行深入研究。蒋明镜等（2013）采用胶结铝棒对岩石的微观胶结模型进行了室内微观试验，并采用PFC2D开展相应的数值模拟实验。以上这些工作都极大地促进了离散单元法在我国各科研领域中的应用。

1.2.3 离散元颗粒流的特点

离散元颗粒流（PFC2D/3D）是基于非连续介质力学方法的数值模拟方法，与连续介质力学方法相比，不必为满足弹塑性力学理论而做出大量的假设和简化，也不必建立研究对象的宏观本构模型，只需针对组成物体的每个颗粒建立单元接触模型。在模拟计算过程中根据颗粒间接触的变化来自动生成宏观本构关系，表现出复杂的力学行为。由于颗粒间可以发生滑移、转动和脱离，离散元颗粒流能够模拟物体的大变形、裂缝发展、断裂等问题，为准确预测和分析现有连续介质理论无法解释和分析的物质力学行为提供了一种新的理论和研究方法。

离散元颗粒流的主要特点体现在以下几个方面：

（1）离散元颗粒流是从微细观结构角度来研究介质的力学特性和行为，研究对象的宏

观物理力学性能是由其微细观结构来决定,在模型生成过程中可通过调整颗粒的属性及其排列方式来实现对不同宏观物理力学性能的模拟。采用离散元颗粒流,可以生成物理力学性能完全相同的数值模型,以研究同一种材料在不同环境下的响应规律,这对于物理试验是难以实现的。

(2) 离散元颗粒流在生成模型时不需要建立介质的宏观本构关系,也不能直接为研究对象的宏观物理力学参数赋值,而是通过模型的细观力学参数和颗粒接触模型来生成与物理试验结果相近的宏观物理参数和本构关系。目前材料的宏观物理性能与细观参数间的相关关系仍不明确,在建模过程中需要反复对细观参数进行调整,才能得到与研究对象宏观物理性能相匹配的离散元颗粒流模型。由于存在多个细观参数会对同一宏观物理参数产生影响的情况,针对研究对象所建立的离散元颗粒流模型不具有唯一性。

(3) 离散元颗粒流软件采用显式差分法求解,所有矩阵不需要存储,大量的颗粒单元仅需适中的计算机内存。模拟过程通过介质系统内部颗粒间的接触状态的变化来精确描述介质的非线性特征,从而确保了在大变形、断裂、脱离等的不稳定的物理过程中快速收敛而得到稳定解。

(4) 离散元颗粒流采用圆形颗粒(圆盘形或球形)堆积组合体来模拟研究对象,圆形颗粒间的接触探测比棱角状物体更为简单,运算具有潜在的高效性。多个圆形颗粒可以组合在一起形成任意形状块体单元,块体单元可以破裂,以满足各种研究的需求。

有鉴于此,在水利工程领域,离散元颗粒流被主要用来从细观力学角度进行岩土和混凝土力学以及相关工程问题的研究。通过将颗粒离散元的细观结构与物理力学试验进行对比分析,就可能建立宏观物理力学特性与细观材料参数间的关系,为岩土材料的力学性能确定指导原则,从而促进水利及岩土工程领域的科学研究和工程进展。

1.3 离散单元法在水利工程中的应用

1.3.1 离散单元法在堤坝渗透变形方面的应用

渗透变形、破坏一直是困扰水利工程堤防、基坑及边坡安全的严重问题。人们很早就意识到渗流对水利工程的影响,早在20世纪Terzaghi(1922)提出了著名的临界水力梯度公式,Bligh(1910)、Sellmeijer(1981)、Ojha等(2001)、刘杰(1979,1992)等学者从不同角度对渗透破坏展开了深入的研究,描述了土颗粒在孔隙中的沉积、扩散规律,进一步完善了临界水头计算公式(刘杰,1979)。在大量模型试验的基础上,有限单元法、无单元法等数值模拟分析方法被引入,但由于无法充分考虑水-土的相互作用以及土体流失后造成了孔隙率和渗流的渐近变化,因此难以真实模拟渗流的发展过程及渗透破坏规律。颗粒在孔隙孔道中的运移过程必然伴随颗粒之间相互作用的过程,从颗粒层面能够对渗透破坏的过程进行模拟和分析,但由于渗透变形是一个非常复杂的过程,流体作用在土体骨架的渗流力会使颗粒发生运动,本身很难满足连续性以及变形协调的要求,颗粒运移所造成的孔隙率的改变也会改变流体的运动,而采用离散元与计算流体动力学耦合的方法能够

较好地解决这一问题（周健等，2006）。

目前，在渗透变形过程中，渗流的计算大多采用达西（Darcy）定律，不考虑渗透系数随时间的变化，在渗透变形的初期基本能满足要求，但随着渗流过程的发展，土体颗粒开始不断流失，渗透系数会随孔隙率的变化而不断变化，如何在渗透变形中来模拟这一渐近过程，一直是流固耦合过程中的难题。日本大阪大学的 Tsuji 等（1993）借鉴有限差分法将流体域划分成若干流体单元，通过流体单元内的颗粒数来确定孔隙率，并由此可以确定渗透系数的实时变化。在此基础上，引入 PFC2D 模型与流体域耦合，在考虑流体与颗粒相互作用的条件下进行了二维流化床试验模拟，图 1.1 为空气流速为 2.4m/s 时的颗粒流动情况，其结果与物理试验结果符合得很好。

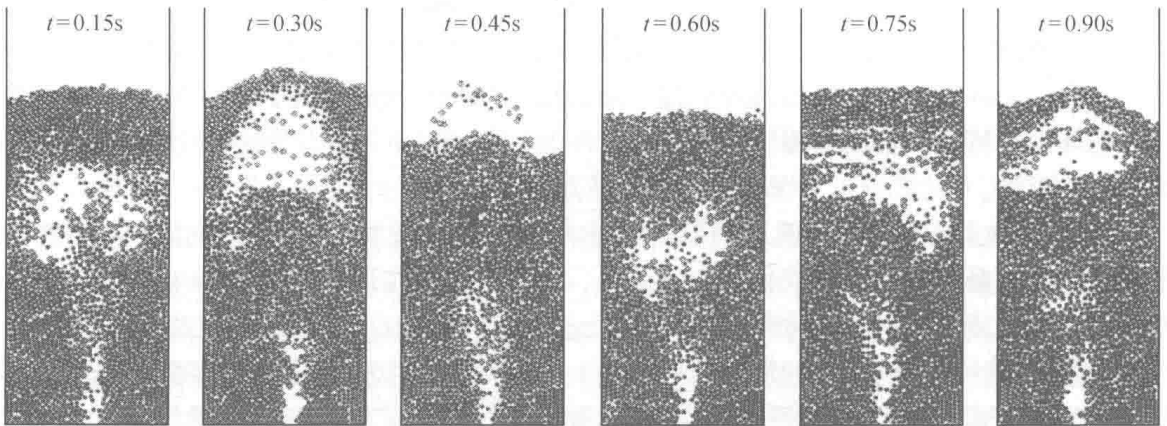


图 1.1 流化床中颗粒的运动 (Tsuji *et al.*, 1993)

美国伦斯勒理工学院的 Shamy 和 Zeghal（2007）采用离散单元法来分析粒状土中孔隙水流与固体相变形间的关系，流体的运动遵循平均 Navier-Stokes 方程，利用离散单元法来模拟颗粒，并建立了半经验公式来模拟流固间的相互作用。

同济大学的周健及河海大学的王媛较早开始在国内采用离散元颗粒流方法进行堤防的渗流及渗透变形的研究，考虑颗粒与液相之间的相互作用力，通过固液两相互相作用模拟动水压力下的渗透变形引起的管涌破坏。周健等（2010）建立了管涌形成和发展规律细观理论模型，采用 PFC2D 对管涌的形成与发展过程中的颗粒移动规律进行了分析研究，利用 PFC3D 对不同层间系数下砂土管涌的基料及反滤层间的颗粒流动进行了仿真模拟；王媛等（2009）则开展了多孔介质中渗透变形相似关系的研究，采用颗粒流 PFC3D，结合流体动力学数值模拟的有限体积法，建立了由裂隙岩体及断层组成的围岩隧洞突水、涌水三维数值模型，模拟隧洞突水、突泥的全过程。以上的研究作为从细观层面对渗透变形的过程进行数值仿真模拟提供了很好的平台。

1.3.2 离散单元法在地层灌浆方面的应用

灌浆是指通过钻孔把浆液压送到建筑物地基的裂隙、断层破碎带中去，以提高被灌地层或建筑物的抗渗性和整体性，改善地基条件，保证水工建筑物安全运行。岩土体的水力

劈裂及灌浆过程是渗流场与应力场的流固耦合过程,涉及地层介质、浆液以及两者的相互作用。在灌浆过程中,浆液利用其自身的压力灌入岩土体中,使得岩土体的强度及渗透性能发生变化,其过程非常复杂,因此到目前为止对灌浆理论的研究尚不成熟(孙斌堂等,2007)。采用有限元或者有限差分法等连续介质力学方法很难处理材料内部开裂、局部滑动和部分分离等非连续性的问题,因此一般更侧重于对注浆效果的模拟,参数确定具有较大的随意性,对浆液扩散范围不能够准确判定(韩磊等,2012),而采用基于散体介质理论、细观力学理论的数值仿真试验技术,可以从细观角度对灌浆过程中岩土颗粒的位移、劈裂及与浆液的耦合作用过程进行深入的分析,为注浆机理研究开辟了一条新的途径(李宁等,2002)。

北京科技大学的吴顺川等(2007)采用 PFC2D 模拟了单孔条件下土体注浆效应,通过对不同土体、不同注浆压力的数值模拟试验,对浆液扩散、土体压密及劈裂效应进行了深入探讨。

利物浦大学的 Al-Busaidi 等(2005)在对 Lac du Bonnet 花岗岩物理试验的基础上,利用 PFC2D 建立直径 60cm 花岗岩数值试样,在其中心 10cm 直径的孔洞中注入高压流体(图 1.2 可以看到微细裂缝萌生和发展过程),对水力劈裂的发生机制进行了深入的分析。

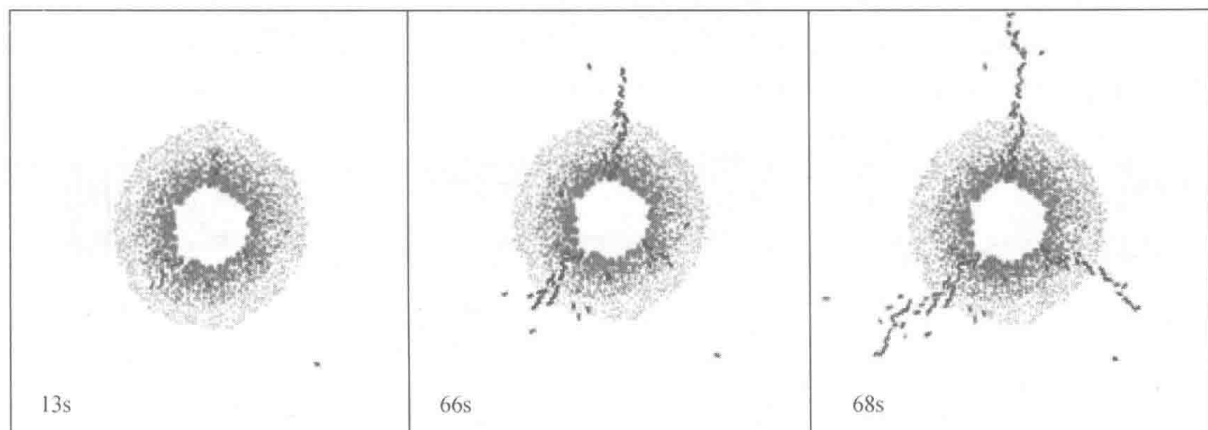


图 1.2 花岗岩水力劈裂裂缝演变过程 (Al-Busaidi *et al.*, 2005)

北京交通大学的孙锋等(2010)建立了颗粒体与流体域耦合的土体注浆模型,对土体劈裂过程进行了细观模拟研究,对比了不同注浆压力和不同土体性质下浆体压力扩散及劈裂裂缝的发生、发展规律。

中国科学院岩土力学研究所的袁敬强等(2011)基于 PFC2D 对软弱土层的注浆过程进行了数值模拟分析,考虑浆液黏度的时变特性,通过特定流体域内的压力,研究了浆液扩散半径、土层渗透性的影响规律,得到的有效注浆半径与球形扩散理论基本一致。

清华大学的 Liu 等(2015)认为水力劈裂的萌生及扩展过程是内在的流固耦合过程,并提出了渗透系数与孔隙尺寸间的内存联系,在黏结性强的岩层水力劈裂裂缝主要是拉伸破坏裂缝,而非黏结土层的劈裂裂缝则主要是由剪切破坏来控制的,剪切破坏裂缝是拉伸破坏裂缝的 2 倍,与其他试验者观测到的结果是相符的。

1.3.3 离散单元法在岩爆方面的应用

岩爆是大深埋地下工程在施工过程中常见的地质灾害，当深部岩体中聚积的高弹性应变能大于岩石破坏所消耗的能量，受到开挖施工等的影响，造成围岩结构的破坏，多余的能量导致岩石爆裂，使岩石碎片从岩体中剥离、崩出。岩爆往往造成开挖工作面的严重破坏、设备损坏和人员伤亡，已成为岩石地下工程和岩石力学领域的世界性难题（He *et al.*, 2010）。众多学者针对岩爆已经提出了刚度理论、能量理论、突变理论、失稳理论等诸多的理论和预测方法，随着计算机性能的不断提高，连续介质力学和非连续介质力学两种数值模拟方法在对岩爆的机理研究起到了重要的作用。岩爆过程实际上是一种连续小变形在较短时间内迅速发展、转变成非连续大变形的过程，以非连续介质力学为基础的数值模拟方法由于可以使构成岩体的单元间相互移动、转动以至完全分离，在模拟岩爆方面有其独到的优势。

捷克理工大学的 Vacek 等（2009）基于 PFC2D 建立煤矿巷道模型，对煤矿开采中的岩爆问题进行了分析。北京科技大学吴顺川等（2010）在室内卸载岩爆试验的基础上，采用 PFC3D 建立了岩石的数值模型并进行了细观力学参数的标定，基于伺服机制模拟了岩体的荷载施加机制，通过删除某一方向的墙体，成功模拟了室内卸载岩爆，如图 1.3 所示，真实反映了卸载岩爆的破坏进程及细观破裂机制。

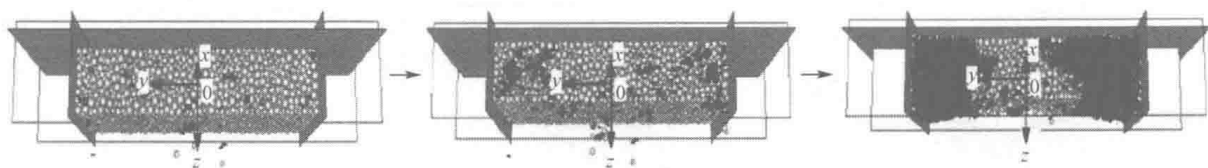


图 1.3 突然卸载的岩爆数值模拟（吴顺川等，2010）

辽宁工程技术大学的李莎莎等（2015）构建基于能量理论的三维改进岩爆模型，提出剩余能量转化方程，建立岩石耗散能和岩石可释放弹性应变能的计算方法，以此为基础建立了 PFC3D 岩爆模型，模拟某矿地质条件下不同深度岩体卸载后引起岩爆的过程。

1.3.4 离散单元法在混凝土工程中的应用

混凝土是水利工程中最重要的建筑材料之一，是由水泥砂浆基质和骨料组成的多相复合材料。早期对混凝土物理力学性能的研究，主要是基于连续介质力学原理，将混凝土视作均匀各向同性材料，用宏观的弹塑性理论来描述混凝土受力后变形和破坏的机理，提出了断裂理论，虽然取得了很多成果，但由于忽略了混凝土各组分材料的缺陷及内部微裂缝等随机分布的对混凝土性质的影响，无法深入分析混凝土初始损伤后的演变、破坏过程中裂缝的发展规律以及裂缝出现后的应力重分布等问题。混凝土属于准脆性材料，内部多存在裂隙、夹杂、气泡、空穴等天然或人为的缺陷，在外荷载作用下微裂隙会首先连通、汇集形成宏观裂缝，从而使其破坏机制出现明显的局部化现象。混凝

土的宏观力学响应从连续变形逐渐向非连续变形发展，是微裂隙逐渐延伸、扩展、汇集成宏观裂缝直至块体分离的过程，而离散元颗粒流软件能够考虑数值模型存在的初始缺陷，模拟单元体间的裂隙萌生及发展过程，可以从细观力学角度较好地阐释混凝土的损伤及断裂机理。

诺丁汉大学的 Collop 等 (2006) 为了明晰颗粒的堆积特征，最大程度减小颗粒间内锁效应，采用单一粒径球形颗粒建立了沥青混凝土数值模拟，进行了单轴和三轴的蠕变试验，分析了 PFC3D 模型的细观参数对宏观物理性能的影响规律。东南大学的 Chen 等 (2011) 从微观细观角度对沥青混凝土刚度各异性进行了研究，通过复合剪切模量试验和抗拉强度试验确定了数值模型的细观参数，分析了骨料的长轴方向分布对沥青混凝土刚度的影响规律 (图 1.4)。

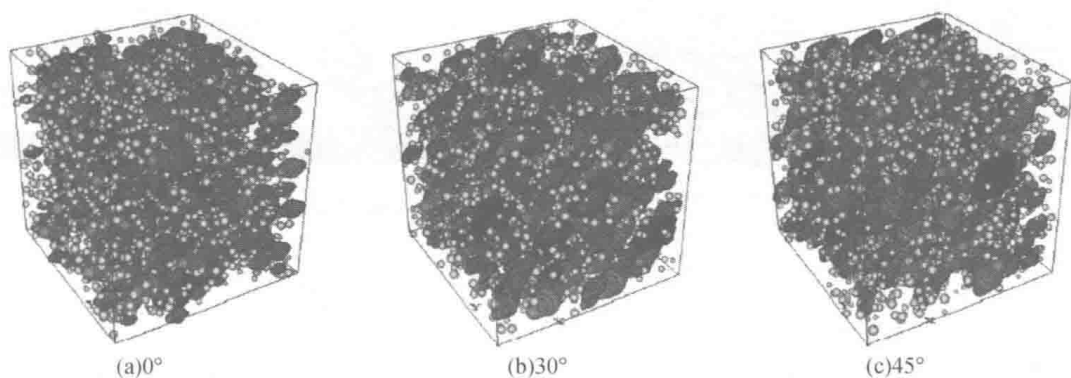


图 1.4 骨料长轴方向与 X 轴间的夹角 (Chen *et al.*, 2011)

河海大学的张正珺等 (2010) 等采用 PFC2D 进行了混凝土试件的单轴压缩试验模拟，选择平行黏结模型来模拟混凝土的强度特征，分析了数值试验的应力-应变曲线和体积应变的规律，认为离散元颗粒流在模拟混凝土材料破坏方面具有显著的优点。布达佩斯技术和经济大学的 Gyurkó 等 (2014) 采用 PFC3D 对硬化混凝土进行了抗压强度的数值模拟，认为在进行充分的细观参数设置的基础上，离散元颗粒流模型与物理试验呈现出极好的相关性，可以精准地模拟抗压强度、杨氏模量以及应力-应变关系。

1.3.5 离散单元法在土力学方面的应用

土体是水利工程中经常遇到的颗粒介质材料，主要是岩体在环境的作用下使得固体的强黏结颗粒破裂成为更小的颗粒，可以将其视作由单个颗粒、颗粒簇经过特定的排列组成的复杂堆积体。土体中颗粒间的排列具有随机性，因此其颗粒的排列堆积特征确定了颗粒间力的传递性能以及变形特性，颗粒间的接触方式 (接触、黏结) 则决定了土体的结构强度，同时土体内部经常存在的不同尺度的裂缝、孔隙等缺陷，导致土体呈现非连续性、非均匀性特征。土体颗粒数量众多，其空间排列方式也极为复杂，毗邻颗粒的接触点间构成了相互交错的力链网络。在外荷载作用下，某些颗粒发生滑移、滚动，都会使颗粒间的力链网络发生变化，导致整体材料的性能产生变化，这与经典的弹塑性材料的响应有明显的区别。

德国计算机应用研究院的 Matuttis (2000) 对颗粒的静态堆积问题进行了研究, 利用离散元建立了颗粒堆积的模型, 分析了摩擦系数、刚度等对堆积摩擦角的影响。马格德堡大学的 Tykhoniuk 等 (2007) 开展了土体的压缩和直剪试验 (图 1.5), 对土体颗粒间的相互作用进行了深入的研究, 认为土体宏观的黏聚力与和颗粒的细观黏接强度成正比, 而材料的宏观摩擦系数是颗粒接触摩擦系数的非线性函数。

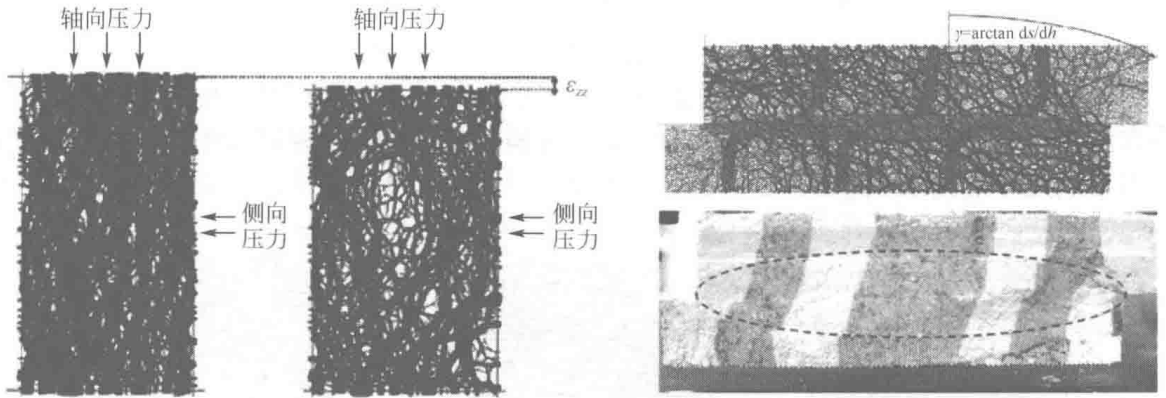


图 1.5 土体的压缩和直剪试验 (Tykhoniuk *et al.*, 2007)

三峡大学的张志华等 (2014) 以室内三轴固结排水试验为基础, 采用 PFC2D 进行了三轴数值试验的数值模拟, 分析了材料中颗粒半径大小、摩擦系数、黏结剂强度对材料宏观力学特性的影响程度。同济大学的郑永来等 (2015) 采用 PFC3D 对散粒体材料在真三轴试验条件下的中主应力对强度及变形的影响进行了分析, 从细观角度对中主应力的影响机制进行了探讨。

1.4 本书主要内容

离散元颗粒流法自 Cundall 教授提出以来, 在岩石力学领域得到了丰硕的成果, 不仅在岩石物理力学特性的机理研究中得到深入的、广泛的应用, 而且开始在锦屏一级水电站、锦屏二级水电站、白鹤滩水电站等水利工程的建设中发挥了重要的作用, 目前 PFC2D/3D 系列软件已经从最初的研究介质力学特性、裂缝扩展等问题, 扩展到了研究高边坡的稳定、地下洞室的破裂损伤、混凝土破坏以及裂隙岩体的水力劈裂等多场耦合问题, 不仅可以分析介质的宏观物理力学特性, 更方便从细观角度来研究其宏观性能的变化机理, 因此在水利工程领域得到越来越多的应用。

本书内容分为以下两大部分:

第一部分: 离散元颗粒流的细观参数及模型建立方法研究。此部分重点对离散元颗粒流的颗粒尺寸效应进行分析, 探讨岩土材料宏-细观参数间的关系, 基于正交试验和中心复合试验设计方法建立了一种细观参数反演方法, 给出了标定程序, 并对不同细观模型建立方法进行及应用进行了较为深入的探讨。此部分内容给离散元颗粒流的使用者便捷地建立岩土体细观模型提供了有益的借鉴。