

离散元颗粒流软件 (PFC) 在道路工程中的应用

陈俊 张东 黄晓明◎著

APPLICATION OF PARTICLE FLOW CODE
IN ROAD ENGINEERING



人民交通出版社股份有限公司
China Communications Press Co., Ltd.

离散元颗粒流软件(PFC) 在道路工程中的应用

陈俊 张东 黄晓明 著



人民交通出版社股份有限公司
China Communications Press Co., Ltd.

内 容 提 要

本书系统地讲述了在道路工程材料性能分析中应用离散元颗粒流软件 PFC2D/3D 的基本理论和方法。主要内容包括:离散元方法的基本原理、PFC2D/3D 软件介绍、PFC 的接触模型及其参数、集料的重构与沥青混合料离散元试件的生成、集料和沥青混凝土基本力学性能的离散元分析实例、沥青混凝土开裂问题的离散元分析实例、沥青混凝土高温变形问题的离散元分析实例以及荷载作用下沥青路面结构响应的离散元分析实例。

本书适合于从事公路设计、研究的技术人员以及各院校师生学习参考。

图书在版编目(CIP)数据

离散元颗粒流软件(PFC)在道路工程中的应用/陈俊,张东,黄晓明著. —北京:人民交通出版社股份有限公司,2015. 1

ISBN 978-7-114-11667-4

I. ①离… II. ①陈… ②张…③黄… III. ①道路工程—工程材料—性能分析—应用软件 IV. ①U414-39

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2014)第 201568 号

书 名: 离散元颗粒流软件(PFC)在道路工程中的应用
著 者: 陈 俊 张 东 黄晓明
责任编辑: 郑蕉林 卢俊丽
出版发行: 人民交通出版社股份有限公司
地 址: (100011)北京市朝阳区安定门外外馆斜街3号
网 址: <http://www.ccpres.com.cn>
销售电话: (010)59757973
总 经 销: 人民交通出版社股份有限公司发行部
经 销: 各地新华书店
印 刷: 北京市密东印刷有限公司
开 本: 720×960 1/16
印 张: 15.5
字 数: 275 千
版 次: 2015 年 1 月 第 1 版
印 次: 2015 年 1 月 第 1 次印刷
书 号: ISBN 978-7-114-11667-4
定 价: 48.00 元

(有印刷、装订质量问题的图书由本公司负责调换)

前言

FOREWORD

道路建筑材料具有几何形态不规则、介质形态多元和力学环境复杂等特征,往往导致道路材料的细观力学特性很难通过试验室的宏观性能试验准确测量。随着计算机技术的发展,以有限元、离散元等为代表的数值方法在道路工程中得到越来越多的应用,尤其是离散元颗粒流方法在分析无黏结的集料颗粒、沥青混合料等力学性能方面显示出了巨大的优势。但是,在交通运输工程领域的道路与铁道工程专业,目前缺乏系统介绍离散元颗粒流软件 PFC2D/3D 功能、使用方法和应用实例的参考书。

作者多年来一直从事离散元颗粒流软件在道路工程中应用的研究工作,为了便于离散元方法在交通运输工程领域的应用与推广,作者将重要的研究成果编写成书供读者参考。全书共分为 9 章,第 1 章概述,第 2 章离散元方法的基本原理,第 3 章颗粒流程序 PFC2D/3D,第 4 章颗粒流程序 PFC 的接触模型及其参数,第 5 章集料的重构与沥青混合料离散元试件的生成,第 6 章集料和沥青混凝土基本力学性能的离散元分析实例,第 7 章沥青混凝土开裂问题的离散元分析实例,第 8 章沥青混凝土高温变形问题的离散元分析实例,第 9 章荷载作用下沥青路面结构响应的离散元分析实例。

本书第 1、8 章由东南大学黄晓明教授编写,第 3、4、6、9 章由河海

大学陈俊副教授编写,第2、5、7章由南京工业大学张东博士编写。全书由东南大学黄晓明教授统稿。

本书受国家自然科学基金(51208178、51178112和51378121)的资助。

限于作者水平,本书难免有谬误之处,恳请有关院校师生及读者批评指正,并提出宝贵意见,以便笔者及时修订、更正和完善,联系邮箱:huangxmseu@gmail.com。

著者
2014年8月

目录

CONTENTS

第 1 章 概述	1
1.1 土木工程中的数值分析方法	1
1.2 离散元方法的历史、发展及应用现状	9
1.3 道路工程中的典型问题	16
1.4 本书的主要内容	20
本章参考文献	21
第 2 章 离散元方法的基本原理	23
2.1 离散元方法的基本思想	23
2.2 离散元方法的基本假定	24
2.3 离散元方法的计算原理	24
本章参考文献	27
第 3 章 颗粒流程序 PFC2D/3D	28
3.1 离散元方法与颗粒流程序 PFC	28
3.2 颗粒流程序 PFC 的组成与工具	34
3.3 颗粒流程序 PFC 的常用命令	38
3.4 颗粒流程序 PFC 的文件类型	50
3.5 颗粒流程序 PFC 的 FISH 语言	52
本章参考文献	81
第 4 章 颗粒流程序 PFC 的接触模型及其参数	82
4.1 PFC 中的接触本构模型	82
4.2 微观参数和宏观参数的关系	85
4.3 沥青混合料的接触本构模型和微观力学参数	91

本章参考文献	98
第 5 章 集料的重构与沥青混合料离散元试件的生成	100
5.1 二维沥青混合料离散元试件的生成	100
5.2 基于离散单元相互重叠算法的三维集料颗粒重构和沥青混合料 离散元试件的生成	114
5.3 基于随机切割算法的三维集料颗粒重构和沥青混合料离散元试 件的生成	121
本章参考文献	127
第 6 章 集料和沥青混凝土基本力学性能的离散元分析实例	129
6.1 沥青混合料中集料力学特性研究	129
6.2 集料的三轴剪切试验模拟	137
6.3 沥青混合料动态模量试验的离散元模拟	153
6.4 沥青混合料各向异性研究	165
本章参考文献	171
第 7 章 沥青混凝土开裂问题的离散元分析实例	172
7.1 沥青混合料小梁断裂试验模拟	172
7.2 沥青混合料劈裂试验的离散元模拟	180
本章参考文献	186
第 8 章 沥青混凝土高温变形问题的离散元分析实例	187
8.1 沥青混合料蠕变试验的离散元模拟	187
8.2 沥青混合料车辙试验的离散元模拟	206
本章参考文献	227
第 9 章 荷载作用下沥青路面结构响应的离散元分析实例	229
9.1 路面结构的离散元模型与参数	229
9.2 静止荷载作用下路面结构响应	231
9.3 振动荷载作用下路面结构响应	233
9.4 移动荷载作用下路面结构响应	234
本章参考文献	237

第 1 章 概 述

本章简要介绍了土木工程中常用的数值分析方法,详细阐述了离散元方法的历史、发展和应用状况,并通过道路工程中一些典型问题的介绍与分析,叙述了在道路工程中应用离散元方法的必要性。

1.1 土木工程中的数值分析方法

1.1.1 数值分析方法及其分类

土木工程、交通运输、采矿工程和水利水电等领域,涉及的材料具有种类多样性、几何形态的不规则性、介质形态多元性和力学环境复杂性等特征,具体表现为:

①材料多样性。工程领域涉及的材料种类繁多,包括:土、岩石、石灰、水泥、水泥混凝土、沥青混凝土等。

②几何形态的不规则性。很多材料为不规则形状,如弯曲的构件等。

③介质形态多元性。不是单一介质,而是由多种介质组成的复合材料,如沥青混凝土是由沥青、矿料和孔隙所组成。

④力学环境复杂性。材料在工作期间往往处于拉、压、剪、扭及其复合应力等多种受力环境。例如,在汽车移动荷载作用下,沥青路面中面层的沥青混凝土,一般受到压应力和剪应力共同作用,而表现出复杂的受力状态,且这种受力状态随着沥青混凝土在路面中所处的深度、沥青混凝土的模量、路面结构形式、车辆荷载的大小、荷载移动加速度等因素的改变而改变。

由于上述特点,使得工程上应用材料力学、弹性力学、土力学、岩石力学和结构力学中的传统方法,无法在数学上获得解析解或者计算极其复杂。例如,对于图 1-1a)所示的简单桁架^[1],由 $\sum F_x = 0$, $\sum F_y = 0$, $\sum M = 0$,分别列出①、②、③杆的力平衡方程,可以计算各杆件的应力。但是,当杆件组合形式复杂,如图 1-1b)所示,采用结构力学的传统方法计算将极为繁琐,很难求解。

由此可见,只是少数方程性质比较简单,且几何形状相当规则的问题,可以

采用解析方法求出精确解。对于大多数问题,由于方程的非线性性质,或由于求解区域的几何形状比较复杂,则不能得到解析解。在此背景下,数值分析方法应运而生,伴随着计算机技术的飞速发展,数值分析方法已成为求解科学技术问题的重要工具之一。

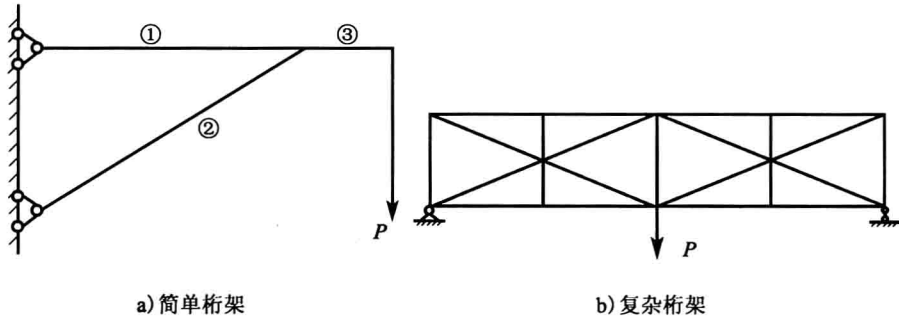


图 1-1 桁架受力分析

目前,数值分析方法,主要包括确定性分析方法和非确定性分析方法。其中,确定性分析方法主要有连续介质分析方法和非连续介质分析方法两大类^[1]。

连续介质分析方法主要包括:

- ①有限单元法(Finite Element Method, FEM),如 ANSYS、NASTRAN、SAP、ADINA、LUSYS、3D-Sigma、ABAQUS、ALGOL、PKPM 等程序。
- ②边界元法(Boundary Element Method, BEM)。
- ③有限差分法(Finite Difference Method, FDM)。如 FLAC 程序。
- ④无单元法(Element-Free Galerkin Method, EFG)。

非连续介质分析方法主要包括:

- ①离散元法(Discrete Element Method, DEM),如 UDEC、PFC 等程序。
- ②关键块体理论(Key Block Theory, KBT)。
- ③不连续变形分析法(Discontinuous Deformation Analysis, DDA)。

非确定性分析方法主要有以下 6 种方法。

①模糊数学方法。模糊理论用隶属函数代替确定论中的特征函数描述边界不清的过渡性问题,模糊模式识别和综合评判理论对多因素问题分析适用,如岩土工程环境评价、岩体分类等。

②概率论与可靠度分析方法。运用概率论方法分析事件发生的概率,进行安全和可靠度评价,如工程可靠度分析、岩石稳定性判断等。

③灰色系统理论。以“灰色、灰关系、灰数”为特征,研究介于“黑色”(完全

未知系统)和“白色”(已知系统)之间事件的特征,在社会学和自然科学领域应用广泛。

④人工智能与专家系统。应用专家的知识和经验进行知识处理、运用、推理,并对复杂问题给出合理的建议和决策,如建筑结构加固方案的优化、道路维修方案的优化等。

⑤神经网络方法。通过模拟人脑的神经系统构建信息处理系统,由神经网络的学习、记忆和推理进行信息处理。

⑥时间序列分析法。通过对系统行为的涨落规律统计,用时间序列函数研究系统的动态力学行为,如路基沉降变形规律等。

在上述数值分析方法中,有限元法和有限差分法在工程领域应用最为广泛,边界元法、无单元法和离散元法近几年也得到了迅速发展。下面将着重对有限元法、有限差分法、边界元法、无单元法和离散元法的基本原理、特点和应用情况逐一进行介绍。

1.1.2 有限元方法

1) 基本原理

有限元法是数值分析方法的一种,其基本思想是将连续的求解区域离散为一组有限个且按一定方式相互联结在一起的单元组合体。由于单元能按不同的联结方式进行组合,且单元本身又可以有不同形状,因此可以模拟几何形状复杂的求解域。有限单元法作为数值分析方法的另一个重要特点是,利用在每一个单元内假设的近似函数来分片地表示全求解域上待求的未知场函数。单元内的近似函数,通常由未知场函数及其导数在单元的各个节点的数值和其插值函数来表达。这样一来,一个问题的有限元分析中,未知场函数及其导数在各个节点上的数值就成为新的未知量(也即自由度),从而使一个连续的无限自由度问题变成离散的有限自由度问题。一经求解出这些未知量,就可以通过插值函数计算出各个单元内场函数的近似值,从而得到整个求解域上的近似解。显然,随着单元数目的增加,即单元尺寸的缩小,或者随着单元自由度的增加及插值函数精度的提高,解的近似程度将不断改进。如果单元是满足收敛要求的,近似解最后将收敛于精确解。

2) 起源与发展

自1943年Richard Courant教授提出有限元的基本思想以来,有限元法开始引起人们的关注,其发展历程大体可分为两个阶段:早期发展阶段和发展完善阶段。

(1) 早期发展阶段

20 世纪 50 年代,美国波音公司首次采用三节点三角形单元,将矩阵位移法应用到平面问题上。20 世纪 60 年代初,Clough 教授首次提出“有限元”这个名称,标志着有限元法早期发展阶段的结束。

(2) 发展完善阶段

20 世纪 60 年代之后,有限元法进入了发展完善阶段。在国外,与有限元相关的数学和工程学基础开始建立;收敛性得到了进一步研究,形成了系统的误差估计理论;有限元法的商业软件开始得以开发与应用。在国内,数学家冯康于 1965 年发表了《基于变分原理的差分格式》,标志着有限元法在我国的诞生。我国著名力学家、教育家徐芝纶院士于 1974 年编著出版了我国第一部关于有限元法的专著——《弹性力学问题的有限元法》,开创了我国有限元应用及发展的历史。目前,有限元方法已经在土木工程、交通运输、生物医学、机电工程等众多领域得到了广泛应用,已由二维问题扩展到三维问题、板壳问题,由静力学问题扩展到动力学问题、稳定性问题,由线性问题扩展到非线性问题。

3) 解题步骤

对于不同的工程问题和不同的有限元软件,有限元法的解题过程不尽相同,但其主要的解题过程包括以下 8 个步骤。

(1) 结构离散

结构离散就是建立结构的有限元模型,又称为网格划分或单元划分,即将结构离散为有限个单元组成的有限元模型。

(2) 单元分析

根据弹性力学的几何方法和物理方法,确定单元的刚度矩阵。

(3) 整体分析

把各个单元按原来的结构重新连接起来,并在单元刚度矩阵的基础上确定结构的总刚度矩阵。

(4) 荷载移置

根据静力等效原理,将荷载移置到相应的节点上,形成节点荷载矩阵。

(5) 边界条件处理

对有限元线性方程进行边界条件处理。

(6) 求解线性方程

求解有限元线性方程,得到节点的位移。若有限元模型的节点越多,则方程的数量越多,计算量也越大。

(7) 求解单元应力及应变

根据节点位移,求解单元的应力和应变。

(8) 结果处理与显示

对计算出来的结果进行加工处理,并以各种形式将计算结果显示出来。

4) 有限元法的优缺点

有限元法的优点主要表现为:

①有限元法直接在力学模型上进行离散化(网格划分),物理概念清晰,简单易懂。

②有限元法有较好的适应性,对于简单问题和复杂问题基本上同等处理。

③有限元法的各个计算步骤,如单元分析、总体分析和方程解算等都较易标准化和程式化,有一套比较固定的分析顺序。

④以有限元法为基础的商业程序较多,如 ANSYS、SAP、ADINA、ABAQUS 等,大多数程序便于工程技术人员掌握和使用,且具有很好的应用基础。

尽管有限元法具有很多优点,在处理很多工程问题时发挥了不可替代的作用,但其不足之处也不容忽视,主要有:

①对于颗粒数量较多、形状各异、分布随机的散体材料,有限元在设定材料的性质时存在相当大的困难。

②对于刚柔接触问题、具有滑动性质的刚性接触问题,有限元尚没有能力判别,因此不具有按不同接触方式进行判别的能力。

③在外部荷载作用下,构件因内部存在裂缝、缺陷等会产生不连续的应力场,而有限元分析方法中采用的插值函数是连续的,采用连续的插值法不适宜描述交界处不连续的接触力学行为。

1.1.3 有限差分法

1) 基本原理

有限差分方法是计算机数值模拟最早采用的方法之一。该方法将求解域划分为差分网格,用有限个网格节点代替连续的求解域。有限差分法以 Taylor 级数展开等方法,把控制方程中的导数用网格节点上的函数值的差商代替进行离散,从而建立以网格节点上的值为未知数的代数方程组。该方法是一种直接将微分问题变为代数问题的近似数值解法,数学概念直观,表达简单,是发展较早且比较成熟的数值方法。

20 世纪 80 年代以来,有限差分法在工程计算中得到了广泛的应用,其中较成功的计算软件是 ITASCA 国际咨询公司开发的 FLAC。它采用显式快速拉格朗日算法获得模型全部运动方程的时间步长解,根据计算对象的形状,将计算区

域划分成离散网格,每个单元在外载和边界的约束下,按照约定的线性或非线性的应力—应变关系产生力学响应。

2)有限差分法与有限元法的差异比较

(1)在网格划分方面

①有限元法。对物理模型进行离散,网格划分不用规则,各种单元可以混合使用,所以写不出方程也可以求解。

②差分法。划分的网格是规则的,对方程进行离散化,用很多个差分代替微分,用线性方程组代替微分方程。

(2)在方程计算效率方面

与有限元法相同,有限差分法也是产生一组待解的方程组。所不同的是,有限元法通常采用隐式、矩阵解算方法,而有限差分法采用“显式”、时间递步法解算代数方程,计算效率要高于有限元法,计算量小于有限元法。例如,对于一个四边固定方板,划分网格如图 1-2 所示,方板有 12 个节点,用差分法只有挠度 ω 一个未知量,其总刚度矩阵为 12 阶。但采用有限单元法时,一个节点有 3 个未知量($\omega, \theta_x, \theta_y$),其总刚度矩阵为 36 阶。

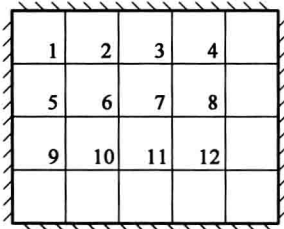


图 1-2 四边固定的方板

总之,有限差分法与有限元法都具有各自的特点,两者的优缺点归纳如下。

有限差分法:直观,理论成熟,精度可选,易于并行计算;但是,在不规则区域处理繁琐。

有限元法:适合处理复杂区域,精度可选;但是,计算量巨大,计算机内存要求高,不如有限差分法直观。

1.1.4 边界元方法

1)基本原理

边界元法(Boundary Element Method,简称 BEM),也称边界积分方程法(Boundary Integral Equation Method,简称 BIEM)。边界元法是在有限元法之后发展起来的一种较精确、有效的工程数值分析方法。它以定义在边界上的边界积分方程为控制方程,通过对边界分元插值离散,化为代数方程组求解。它与基于偏微分方程的区域解法相比,由于降低了问题的维数,而显著降低了自由度,边界的离散也比区域的离散方便得多,可用较简单的单元准确地模拟边界形状,最终得到阶数较低的线性代数方程组。又由于它利用微分算子解析的基本解作为边界积分方程的核函数,而具有解析与数值相结合的特点,通常具有较高

的精度。特别是对于边界变量变化梯度较大的问题,如应力集中问题,或边界变量出现奇异性的裂纹问题,边界元法被公认为比有限元法更加精确、高效。由于边界元法所利用的微分算子基本解能自动满足无限远处的条件,因而边界元法特别便于处理无限域和半无限域问题。

2) 起源与发展

边界积分方法的基本思想在 19 世纪中叶开始形成,其基本思想是基于格林公式,把一个区域上的积分转化为区域边界上的积分。Proudman、Kellogg 分别于 1925 年、1929 年把这一思想应用于位势理论和流体力学方面,当时的初衷是从理论上推导出解的积分表达式,特别是对无限或半无限区域建立解的表达式,而不是为了数值计算的目的。

一直到 20 世纪 60 年代,随着计算机技术和数学理论的迅速发展,边界积分方程法才开始应用于数值计算。这方面, Friedman 和 Shaw (1962 年)、Hess (1962 年)、Banaugh 和 Goldsmith (1963 年)均进行了大量研究工作。

由于在边界积分方程法发展的初期,重点放在边界积分的推导过程,而不是对边界积分方程的数值解过程,而近代的边界积分方程法不仅包含了各种形式的边界积分公式化过程,更重要的是包含了求解边界积分方程数值解的离散化方法,以及处理各种工程实际问题的方法;因此,有人主张作为一种与有限差分法、有限单元法并列的离散化数值计算方法,应当称为边界元方法。

我国在 1978 年才开始进行边界元法的研究,包括冯康、杜庆华、何广乾等在内的我国学者,在边界元法的研究、发展与推广方面做了大量的工作,并且发展了相应的计算软件,有些已经应用于实际工程问题,并收到了良好的效果。

3) 边界元法的优缺点

作为一种数值分析方法,边界元相对于其他方法的主要优点有:

- ①降低维数,便于模拟复杂的几何构件。
- ②高精度。
- ③适用于处理高梯度,甚至有奇异性的问题。
- ④适用于处理无限域、半无限域问题。

常规边界元法的缺点主要有:

- ①求解方程组具有非对称满阵,解题规模受限制。
- ②对一般非线性问题,缺少高效计算方案,由于在方程中会出现域内积分项,从而部分抵消了边界元法只要离散边界的优点。

③应用范围以存在相应微分算子的基本解为前提,对于非均匀介质等问题难以应用,故其适用范围远不如有限元法广泛。

1.1.5 无单元法

1) 基本原理

有限元法经过半个多世纪的研究和发展,已成为工程和科学领域的重要数值计算工具。目前人们已经开发了大量的有限元商业软件,并在工程分析中得到了广泛应用。有限元法是基于单元网格的数值方法,由于固有网格的限制,在求解一些工程问题时变得相对困难,如裂纹扩展问题、结构大变形问题、爆炸问题、高速冲击问题等。

网格的存在妨碍了处理与原始网格线不一致的不连续性和大变形问题,有限元基于网格方法在处理随时间变化不连续和大变形时常用网格重构,然而这样不仅增加了计算费用,而且会使计算的精度严重受损^[2]。

不同于有限元法,无单元法是建立在一系列离散的节点上,不需要借助网格,克服了有限元法对网格的依赖性,在涉及网格畸变、网格移动等问题中显示出明显的优势。

2) 起源与发展^[2]

20世纪70年代, Lucy 和 Gingold 等人提出了光滑质点流体动力学 (Smoothed Particle Hydrodynamics, 简称 SPH), 并成功应用到天体物理的计算领域,这是最早出现并得到很好应用的无单元法。但是,由于当时有限元法的研究正处于巨大成功阶段,无单元法并未引起人们的广泛关注,因而发展缓慢。

直到20世纪90年代初, Nayroles 等人将移动最小二乘法 (Moving Least Square, 简称 MLS) 引入伽辽金方程的求解,提出了模糊单元法 (Diffuse Element Method, 简称 DEM)。美国西北大学的 Belytschko 教授在对模糊单元法进行了两点改进后,提出了著名的无网格伽辽金法,无单元法才得到突飞猛进的发展。

到目前为止,已经出现了十几种形式的无单元法,主要有:光滑指点流体动力学,模糊单元法,无网格伽辽金法,局部边界积分方程无单元法,无单元局部彼得诺夫—伽辽金法,自然邻居彼得诺夫—伽辽金法,小波伽辽金法,再生核质点法,多尺度再生核质点法,移动最小二乘积分核法,点插值法,区域点插值法,点到点法,有限覆盖法,有限球法,有限点法,单位分解法,自然单元法,边界无单元法。

3) 无单元法的优缺点

与传统数值方法相比,无单元法具备许多显著的优点,主要包括:

①无单元法的近似函数没有网络的依赖性,减少了因网络畸变带来的困难,适合于处理高速碰撞、动态裂纹扩展、塑性流动、流固耦合等涉及大变形的计算

问题。

②无单元法的基函数可以包含能够反映待求问题特性的函数系列,适合于分析各类具有高梯度、奇异性等特殊性的应用问题。

③要求输入的数据简单,使用无单元法分析只需要节点的信息,不需要对计算域进行网格划分,极大地简化了前处理工作,而且在计算过程中可以根据需要对某一区域增加或减少节点,便于进行自适应计算,也能提高局部区域的计算精度。

④计算精度高,由于无单元法采用的是连续型函数,其导数一般也是连续的,对应力计算时无需修匀,并能很好地反映局部高梯度情况,对于不可压缩材料进行计算时可以有效防止体积闭锁。

但是,作为一种新兴的数值方法,无单元法无论在理论上还是应用上都有待进一步研究。第一,无单元法采用最小二乘法达到较高的计算精度,但同时也降低了计算效率。如何提高无单元法的计算效率是将无单元法推广到三维情况时必须解决的问题。第二,实际岩土工程和水利工程中有大量的结构都是非线性的,无单元法对非线性问题的模拟有待于进一步开发。第三,无单元法作为新兴的数值方法,无论是在理论上还是应用上都远没有有限元法成熟,将无单元法与有限元法等传统数值方法结合,将使无单元法的应用变得更加灵活实用。在大部分区域应用有限元法,而在一些区域如应力集中区、自由面迭代区等应用无单元法,既可以根据需要提高某些区域的精度,又可以克服无单元法计算效率低的缺点。

1.2 离散元方法的历史、发展及应用现状

1.2.1 离散元方法的起源与发展

离散元法是 Cundall 于 1971 年提出来的,当时为了与连续介质力学中的 Finite Element Method 相区别,离散元方法称为 Distinct Element Method。该法适用于分析在准静力或动力条件下的节理系统或块体结合的力学问题,最初用于分析岩石边坡的运动。后来用 Discrete Element Method 取代了 Distinct Element Method,以反映系统是离散的这一本质特征。

到 1974 年,二维的离散元法程序趋于成熟,当时已有屏幕图形输出的交互会话功能,但由于计算机内存的限制,不少程序段用汇编语言写成,到 1978 年才全部翻译成 Fortran 文本。1979 年,Cundall 和 Strack 又提出了适于土力学的离

散元法,并推出二维圆盘(disc)程序 BALL 和三维圆球程序 TRUBAL(后发展成商业软件 PFC2D/3D),形成较系统的模型与方法^[3]。

Lemos 于 1983 年开发了离散元法与边界元法耦合的半平面问题的程序,并用以计算节理和断裂介质中的应力分布问题^[4]。

Lorig 于 1984 年开发了包括前处理和后处理的离散元法和边界元法耦合的程序^[5]。翌年,他在澳大利亚英联邦科学与工业发展组织的岩土力学研究所,修改了他原先的程序,这个修改后的程序被称为 HYDEBE(Hybrid Discrete Element Boundary Element),它的功能更为强大,包括一个前处理程序 CREATE,类似于有限元程序中的自动划分网格,一个与边界元法耦合的程序 BOUND 和一个离散元法程序 BLOCK。

1980 年,Cundall 开始研究块体在受力后根据破坏判据允许断裂的离散元法,并于 1985 年完成了 UDEC(Universal Distinct Element Code)程序的编写。UDEC 现已广泛应用于岩石力学和采矿工程,被公认为对节理岩体进行数值模拟的一种有效方法。

至于三维离散元的发展则要迟些,其主要原因是数据结构复杂,要求计算机具有较大的容量。三维离散元法的程序 3DEC(3-Dimensional Distinct Element Code)已由 Cundall 与 Itasca 咨询集团于 1986 年合作开发出来。其基本原理同 UDEC 一样,但是数据结构有了较大的改进,以适应三维问题的特点。

我国对离散元法的研究与应用起步较晚。直到 1986 年,在第一届全国岩石力学数值计算及模型试验讨论会上,王泳嘉首次向我国岩石力学与工程界介绍了离散元法的基本原理及几个应用例子^[6]。随后,我国学者充分利用离散元法并结合实际工程问题进行了大量的研究,取得了很好的成绩。目前,在采矿工程、岩土工程、水利水电工程和道路工程等领域,离散元方法均得到了应用,并呈方兴未艾之势^[7-11]。

1.2.2 离散元法的特点与优势

离散元方法具有十分鲜明的特点,表现为以下几个方面:

- ①岩体或颗粒组合体被模拟成通过角或边的相互接触而产生相互作用;
- ②块体之间边界的相互作用可以体现其不连续性和节理的特性;
- ③使用显式积分迭代算法,允许有大的位移、转动;
- ④离散元法可使用各种非线性模型描述块体或颗粒之间的接触。

上述特点使得离散元法与其他数值分析方法,尤其是有限元法相比,具有许多无可比拟的优势,主要有: