

*Particulate Discrete Element Method  
and Its Application  
to the Simulation of Sand Behavior*

# 颗粒离散元法

及在砂土力学特性模拟中的应用

史旦达 邓益兵 刘文白 周 健◎著



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

Particulate Discrete Element Method and Its Application to the  
Simulation of Sand Behavior

# 颗粒离散元法及在砂土力学特性 模拟中的应用

史旦达 邓益兵 刘文白 周健 著



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

## 内 容 提 要

本书系统介绍了颗粒离散元法及其应用程序,并重点介绍了颗粒离散元法在砂土力学性质细观模拟中的应用。其主要内容包括砂土单元试验细观模拟(三轴、双轴、直剪、单剪等),砂土振动液化细观模拟,砂土-结构面相互作用细观模拟,砂土颗粒破碎细观模拟,离散-连续耦合分析方法及其应用等。

本书可供土木工程、水利工程、道路工程、地质工程等专业的研究生,以及教师和相关专业的工程技术人员参考,本书还可作为其他专业的颗粒离散元及其应用软件使用者的参考用书。

### 图书在版编目(CIP)数据

颗粒离散元法及在砂土力学特性模拟中的应用 /  
史旦达等著. —北京:人民交通出版社股份有限公司,  
2016.10

ISBN 978-7-114-13100-4

I. ①颗… II. ①史… III. ①数值计算—应用—砂土—  
土力学—研究 IV. ①TU441

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2016)第 131869 号

书 名: 颗粒离散元法及在砂土力学特性模拟中的应用

著 者: 史旦达 邓益兵 刘文白 周 健

责任编辑: 袁 方

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: 北京鑫正大印刷有限公司

开 本: 787×1092 1/16

印 张: 16.5

字 数: 405 千

版 次: 2016年10月 第1版

印 次: 2016年10月 第1次印刷

书 号: ISBN 978-7-114-13100-4

定 价: 62.00 元

(有印刷、装订质量问题的图书由本公司负责调换)

# 前 言

颗粒离散元法(Particulate Discrete Element Method, PDEM), 又称颗粒离散单元法, 是由 Cundall 和 Strack 于 1979 年首先提出并创立起来的。在学术界和工业界的共同努力下, 特别是在最近的 20 年里, 颗粒离散元法得到了长足的进步, 目前已广泛应用于岩土工程、道路工程、采矿工程、冶金工程、化学工程、农业与食品工程、制药与环境工程等多个学术研究与工程应用领域。与有限元法、边界元法等连续介质力学数值分析方法相比, 颗粒离散元法属于非连续变形介质力学的数值分析方法。该方法的最大优势在于能够真实地描述散体颗粒介质的流动变形特征, 能够反映颗粒之间的接触、分离、滑移、旋转等细观力学特征, 能够揭示宏观力学响应与细观组构演化之间的宏细观关联; 并且能够方便地实现与计算流体力学、有限元、边界元、有限差分等数值方法的耦合, 以解决大尺度的工程问题。

对土力学试验的模拟是颗粒离散元法应用于岩土工程的一项重要研究内容, 也是本书内容的聚焦点。一方面, 通过对典型土力学试验的模拟, 可以验证颗粒离散元数值建模的可靠性, 完成细观参数的标定并进行参数敏感性分析等工作, Cundall 和 Strack 早期关于二维 BALL 程序有效性的验证就是针对土力学试验的模拟展开; 另一方面, 数值模拟可以获取试样内部丰富的细观组构信息, 而这些细观组构信息利用常规的试验观测手段几乎是无法得到的, 通过分析和建立宏细观力学量之间的关联, 可以更深入地揭示土体试样强度与变形特性的内在力学机理。

本书内容以作者所在课题组在国家自然科学基金项目资助下取得的研究成果为基础, 系统介绍了颗粒离散元法及其在砂土力学性质细观模拟中的应用。全书共分 9 章。第 1 章, 绪论; 第 2 章, 颗粒离散元细观建模中的几个重要问题; 第 3 章, 砂土三轴(双轴)试验细观模拟; 第 4 章, 砂土直剪试验细观模拟; 第 5 章, 砂土单剪试验细观模拟; 第 6 章, 砂土振动液化细观模拟; 第 7 章, 砂土-结构面相互作用细观模拟; 第 8 章, 砂土颗粒破碎细观模拟; 第 9 章, 离散-连续耦合分析方法及其应用。

本书在编写过程中, 得到了澳大利亚联邦大学薛剑峰博士、西澳大利亚大学王栋博士、广西工业大学王家全博士、同济大学贾敏才博士、杭州市政集团有限公司陈小亮博士、中国公路工程咨询集团有限公司闫东霄高级工程师的大力支持, 他们为本书部分章节的内容提供了素材和插图; 课题组硕士研究生史跻宇、王飞、杨彦骋、丛佩文、郑麟、赵振营、许冰沁等为本书的出版付出了辛勤的劳动。在此, 对他们的大力支持和辛勤工作表示感谢!

本书在颗粒离散元法方面的研究工作得到了国家自然科学基金项目(Nos.

90815008、50909057、51078228、51208294、41372319)、2013年上海市研究生教育创新计划实施项目(第二批)(No. 201311290)、上海市教委科研创新项目(Nos. 14YZ101、15ZZ081)、上海海事大学学术创新团队基金的资助,在此表示衷心的感谢。

由于水平所限,书中难免有许多不足之处,热忱希望读者和同行专家们批评指正。

著作者  
2016年4月

# 目 录

第1章 绪论 .....	1
1.1 引言 .....	1
1.2 离散单元法的基本思想 .....	2
1.3 颗粒离散元法的计算程序 .....	3
1.4 非圆颗粒单元的开发及应用 .....	3
1.5 颗粒流方法及计算程序 PFC <sup>2D/3D</sup> .....	4
1.6 本书的主要内容 .....	5
本章参考文献 .....	6
第2章 颗粒离散元细观建模中的几个重要问题 .....	10
2.1 引言 .....	10
2.2 数值试样的制备方法 .....	10
2.3 数值试样的尺寸效应 .....	11
2.4 数值试样的边界条件 .....	12
2.5 细观参数的标定方法 .....	15
2.6 细观组构的定量分析方法 .....	16
2.7 构建非圆颗粒单元 .....	19
本章参考文献 .....	22
第3章 砂土三轴(双轴)试验细观模拟 .....	26
3.1 引言 .....	26
3.2 三轴(双轴)试验的纯圆颗粒模拟 .....	27
3.3 三轴(双轴)试验的非圆颗粒模拟 .....	35
3.4 砂土临界状态的细观数值模拟 .....	44
3.5 小结 .....	55
本章参考文献 .....	56
第4章 砂土直剪试验细观模拟 .....	59
4.1 引言 .....	59
4.2 砂土半模直剪试验及宏细观力学分析 .....	60
4.3 砂土直剪力学性状的非圆颗粒模拟 .....	72
4.4 初始不同颗粒定向的直剪模拟 .....	81
4.5 小结 .....	89
本章参考文献 .....	90
第5章 砂土单剪试验细观模拟 .....	92
5.1 引言 .....	92
5.2 单剪试验的非圆颗粒模拟 .....	93
5.3 层理面效应的单剪数值模拟 .....	104

5.4 小结 .....	112
本章参考文献 .....	112
<b>第6章 砂土振动液化细观模拟 .....</b>	<b>115</b>
6.1 引言 .....	115
6.2 砂土振动液化的可视化三轴试验研究 .....	116
6.3 砂土振动液化的纯圆颗粒模拟 .....	123
6.4 砂土振动液化的非圆颗粒模拟 .....	130
6.5 初始组构影响砂土液化势的细观模拟 .....	138
6.6 DEM-CFD 耦合方法及在液化模拟中的应用 .....	144
6.7 小结 .....	165
本章参考文献 .....	166
<b>第7章 砂土-结构面相互作用细观模拟 .....</b>	<b>170</b>
7.1 引言 .....	170
7.2 砂土-结构面相互作用宏观细观试验 .....	171
7.3 砂土-结构面相互作用离散元模拟 .....	187
7.4 小结 .....	194
本章参考文献 .....	194
<b>第8章 砂土颗粒破碎细观模拟 .....</b>	<b>196</b>
8.1 引言 .....	196
8.2 颗粒破碎模拟中的黏结模型方法 .....	198
8.3 颗粒破碎模拟中的破碎准则方法 .....	206
8.4 颗粒破碎条件下砂土-结构面相互作用模拟 .....	218
8.5 小结 .....	223
本章参考文献 .....	223
<b>第9章 离散-连续耦合分析方法及其应用 .....</b>	<b>227</b>
9.1 引言 .....	227
9.2 算法介绍 .....	228
9.3 算法验证 .....	235
9.4 应用实例 .....	238
9.5 小结 .....	254
本章参考文献 .....	254



# 第1章 绪 论

## 1.1 引言

土体骨架是由散粒介质构成的颗粒集合体。外加荷载是通过颗粒之间的接触力承受并在其内部相互传递,外加荷载作用下颗粒之间的接触、分离、滑移、旋转等引起的土体内部细观结构的变化,是引发土体宏观变形与强度变化的真正内因。细观力学的发展为从颗粒介质层面探索土体的力学行为提供了重要的研究途径;颗粒细观力学研究的中心任务是,确定散体颗粒介质的细观组构以及细观组构变化对宏观力学响应影响的定量数学关系,并将细观组构演化规律与细观力学理论联系起来,建立起颗粒介质的细观本构关系,并将其用于土体力学性质的宏细观分析。

试验分析法和数值分析法是研究颗粒材料细观力学特性的两种主要研究手段。试验分析法起步较早,日本埼玉大学的 Oda 课题组在试验研究方面做了开创性的工作<sup>[1-7]</sup>,早期的试验分析常采用铝棒、钢珠、玻璃球、光弹材料等理想弹性或刚性材料作为砂土颗粒的替代材料。近年来,X 射线 CT 扫描技术(X-ray CT scanning)<sup>[8-10]</sup>、磁共振成像技术(magnetic resonance imaging)<sup>[11-12]</sup>、同步辐射显微层析技术(synchrotron microtomography)<sup>[13]</sup>等细观观测技术被引入土工试验,针对实际砂土组构分析的研究也不断涌现。另一方面,在砂土组构细观量测与分析上,更为经济、廉价的数字图像相关分析技术得到了快速发展,在室内三轴试样局部变形量测、土工模型试验位移场分析等方面得到了较好的应用<sup>[14-19]</sup>。然而,试验方法得到的组构信息仍较为有限,特别是颗粒之间的细观接触力及其分布规律很难由试验方法有效揭示。

数值分析法可以作为试验方法的重要补充。对于颗粒介质土体的模拟,数值方法的应用以 Cundall 和 Strack 于 1979 年提出的颗粒离散元法为代表<sup>[20]</sup>;数值分析法虽起步稍晚,但近年来发展迅速。与试验分析法相比,数值分析法具有以下两个显著优点:

(1)可以保证试样的初始完全“同一性”,避免了室内试验制样过程的固有离散性,从而可以更准确地研究细观参数变化对试样宏观力学响应的影响。

(2)在得到宏观力学响应的同时,可以获得任意加荷时刻试样内部大量细观组构参量的空间分布与统计平均,从而能够更有效地研究土体细观组构变化与宏观力学响应之间的内在联系。

目前,颗粒离散元法已经成为细观土力学研究的有力工具,并广泛应用于直剪、单剪、三轴、侧向压缩、平面应变、真三轴等典型土力学单元试验的细观模拟中<sup>[21-26]</sup>。颗粒离散元法应用的领域较广,国内外不同课题组的研究也都各具特色,例如,英国帝国理工大学 O'Sullivan 课题组在液化模拟方面、英国诺丁汉大学 McDowell 课题组在颗粒破碎模拟方面、美国新墨西哥大学 Ng 课题组在非圆颗粒模拟方面、同济大学蒋明镜课题组在细观本构模型开发及应用方面、华中科技大学郑俊杰课题组在桩承式路堤承载机理研究方面、香港城市大学王剑锋



课题组在结构面剪切带模拟方面、浙江大学杨仲轩课题组在各向异性砂土力学性质模拟方面都取得了重要的成果。限于作者水平,本书的内容不可能面面俱到,因此仅结合作者的研究专长,重点向读者介绍颗粒离散元法在砂土力学特性细观模拟、特别是在砂土单元试验细观模拟中的应用。

## 1.2 离散单元法的基本思想

离散单元法的思想最早源于 1957 年 Alder 和 Wainwright 提出的分子动力学 (molecular dynamics) 方法。1971 年 Cundall<sup>[27]</sup> 提出了适用于岩石力学问题的离散单元法,并将其用于岩质边坡的渐进破坏分析。此后,Cundall 和 Strack (1979)<sup>[20]</sup> 将其推广至散粒土的细观力学行为分析。离散单元法的基本思想是将不连续体分离成若干离散单元的集合,单元间按实际问题情况选择合理的接触本构关系,各单元满足运动方程,用时步迭代方法求解各单元运动方程,继而求得不连续体的整体运动形态。离散单元法的特点是允许单元间的相对运动,单元间无须满足连续介质力学的位移连续与变形协调条件,其运动方程的时步迭代通常采用显式的中心差分格式,无须建立大型刚度矩阵,计算速度快,所需储存空间小,尤其适用于求解岩土体大变形及非线性问题。

在离散单元法中,本构关系体现于力与位移的关系,运动方程为牛顿第二运动定律。其主要计算步骤可分为:

(1) 接触检索。

(2) 以单元间相对位移为基本变量,由力-相对位移关系得到两单元间法向和切向接触力,对单元在各接触点处与其他单元间的作用力以及其他物理场对单元作用所引起的外力(如流场作用下的拽曳力等)求合力和合力矩。

(3) 由牛顿第二运动定律求得单元的加速度,对其进行时间积分(通常采用显式中心差分格式),进而得到单元的速度、位移。

(4) 更新单元位置,进行下一个循环。

在离散单元法求解过程中,接触检索时间占总计算时间的 70% ~ 80%,而接触检索所需的时间又与颗粒数量、颗粒形状及检索算法密切相关。对离散元程序设计而言,选择合理有效的检索算法尤为重要。分格检索法(grid subdivision)是目前最常用的接触检索算法,其最大的优点是可以很方便地实施多台计算机的并行计算,从而大大节省了计算时间<sup>[28]</sup>。为了最大限度地提高离散元的计算效率,近年来,研究者开始尝试进行 GPU(Graphical Processor Unit) 开发,并将其用于大尺度的颗粒数量庞大的三维离散元分析中<sup>[29]</sup>。

离散单元法按其单元的几何形状特征可以分为块体离散元法与颗粒离散元法。块体离散元法一般用于节理岩体的破坏问题分析,其单元在三维条件下常用四面体元或六面体元,在二维条件下可以是任意多边形元;颗粒离散元法一般用于土体等散体颗粒介质的非连续变形分析,其单元在三维条件下常用圆球或椭球,在二维条件下常用圆盘或椭圆,其单元分类可见图 1-1。本书介绍的例子仅限于颗粒离散元范畴。

离散元法的基本原理并不复杂,且特别适合于研究散体材料的变形和运动规律,这一点已得到了学术界和工程界的共识。离散元从提出至今已有 40 多年的历史,关于离散元法也已有不少专著,例如,东北大学王泳嘉和邢纪波于 1991 年所著的《离散单元法在岩土力学中的应用》<sup>[28]</sup>,英国帝国理工大学 O' Sullivan 于 2011 年所著的《Particulate Discrete Element Modelling: A Geomechanics Perspective》<sup>[30]</sup>,在这些专著中,都已经对离散元法的基本原理做

了较为细致的介绍,因此,本书在此不再对离散元法的原理做过多赘述。

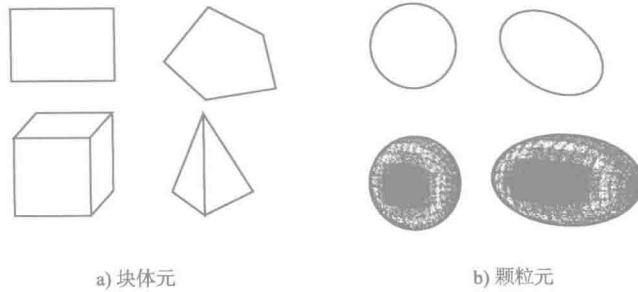


图 1-1 离散元的单元分类

### 1.3 颗粒离散元法的计算程序

颗粒离散元法最早的程序是 Cundall<sup>[31]</sup>于 1978 年基于 Fortran 语言开发的二维 BALL 程序, Cundall 和 Strack (1979)<sup>[20]</sup>利用该程序研究了颗粒介质的细观力学行为, 所得结果与 De Josselin de Jong 和 Verruijt (1969)<sup>[32]</sup>光弹试验得到的结果吻合较好, 这使 BALL 程序在土体细观本构关系研究中大放异彩。1984 年 Strack 和 Cundall<sup>[33]</sup>又将 BALL 程序推广至三维情况, 定名为 TRUBAL。1988 年英国 Aston 大学 Thornton 课题组<sup>[34]</sup>引入了 Cundall 的三维 TRUBAL 程序, 从发展颗粒接触模型入手对程序进行了全面改造, 形成 TRUBALL-Aston 版, 后定名为 GRANULE。GRANULE 程序符合弹塑性圆球的接触力学原理, 能较好地模拟干湿、弹性-塑性和颗粒两相流问题。刘连峰 (2007)<sup>[35]</sup>在国内介绍了 GRANULE 程序, 并将其用于理想弹塑性球体系统的准静态变形分析中。1991 年 Ng 和 Dobry<sup>[36]</sup>在 TRUBAL 程序的基础上开发了 CONBAL 程序, 并成功将其用于石英砂的基本力学性质模拟。关于颗粒离散元程序, 还有 Walton (1982)<sup>[37]</sup>开发的 DIBS 程序; Ting 等 (1989)<sup>[38]</sup>开发的 DISC 程序; Bathurst 和 Rothenburg (1989)<sup>[39]</sup>开发的 GLUE 程序; Taylor 和 Preece (1989)<sup>[40]</sup>开发的 DMC 程序; Bardet 和 Proubet (1989)<sup>[41]</sup>开发的 JP2 程序以及 O'Sullivan (2002)<sup>[42]</sup>开发的 3DDEM 程序等。

以上讨论的程序, 其基本单元均为纯圆颗粒 (二维条件下为纯圆盘、三维条件下为纯圆球), 纯圆颗粒的优势是接触检索算法简单、程序实施便捷、计算速度快, 但缺陷是不能反映实际砂土的角粒特征, 不能模拟颗粒的定向规律, 且采用纯圆颗粒会存在颗粒过度旋转问题, 因此在细观组构研究方面存在一定的局限性。

### 1.4 非圆颗粒单元的开发及应用

Ting 和 Corkum (1988)<sup>[43]</sup>、Ng 和 Dobry (1994)<sup>[44]</sup>利用纯圆颗粒程序进行砂土力学性质模拟时发现, 纯圆颗粒模拟存在颗粒过度旋转问题; Iwashita 和 Oda (1998)<sup>[45]</sup>曾提出了考虑旋转阻抗 (rolling resistance) 的修正离散单元法 (modified discrete element method)。该方法在颗粒接触点处引入限制颗粒旋转的力矩阻抗来改进纯圆颗粒过度旋转问题, 取得了较好的模拟效果。同济大学蒋明镜等 (2005)<sup>[46]</sup>对 Iwashita 和 Oda 提出的方法进行了进一步的改进和提高。研究表明, 在颗粒接触本构关系中引入旋转阻抗关系后, 二维纯圆颗粒数值试样的内摩擦角更接近于实际砂土的内摩擦角范围。近来, Zhao 和 Guo (2014)<sup>[47]</sup>将旋转阻抗模型引入到三维离散元程序中。

颗粒过度旋转问题的另一种解决方法是进行非圆颗粒单元的开发。目前最常用的非圆颗粒单元应属椭圆形颗粒单元(二维条件下为椭圆、三维条件下为椭球);椭圆形颗粒单元在形状上更加接近实际砂颗粒,在组构上由于颗粒间明显的嵌锁效应而限制了单个颗粒的过度旋转,从而为研究颗粒形状、初始组构各向异性等问题提供了数值模拟条件。Ng (1992)<sup>[48]</sup>、Rothenburg 和 Bathurst(1992)<sup>[49]</sup>、Sawada 和 Pradhan(1994)<sup>[50]</sup>、Ting(1991)<sup>[51]</sup>都曾开发过二维椭圆颗粒程序,并研究了颗粒形状对砂土力学性质的影响;其中,Ng 课题组(1997)<sup>[52]</sup>还在二维椭圆颗粒程序 ELLIPSE2 的基础上开发出了三维椭球颗粒程序 EP-PIPSE3D。多边形颗粒是另一种较常用的非圆颗粒单元,其在外形轮廓上要比椭圆颗粒更接近于角粒砂的颗粒形状特征。例如,Barbosa 和 Ghaboussi(1992)<sup>[53]</sup>、Mirghasemi(1997)<sup>[54]</sup>、Matuttis 等(2000)<sup>[55]</sup>都曾开发了二维多边形颗粒程序,并将其用于角粒砂的力学性质模拟中,但采用多边形颗粒的缺陷在于,多边形颗粒之间的接触类型较为复杂,接触检索会耗费大量的计算时间。

椭圆形颗粒或多边形颗粒虽然要比纯圆颗粒更加接近实际砂颗粒,但是从形状上看还是过于单一,研究者们发现,可以通过在纯圆颗粒之间引入某种黏结而将若干纯圆颗粒的聚合体胶结成任意形状的团聚颗粒。例如,Jensen 等(2001)<sup>[56]</sup>利用这种方法生成了7种不同形状的团聚颗粒,每种团聚颗粒由3~7个纯圆盘颗粒构成,每种团聚颗粒具有不同的棱角度,接着由500个团聚颗粒组成试样进行锯齿状加筋材料拉拔数值模拟,研究了颗粒形状对孔隙比及土-结构接触面摩擦角的影响。Ni 等(2000)<sup>[57]</sup>通过将两个粒径不等的纯圆颗粒之间引入黏结模型组成非圆颗粒单元,并利用非圆颗粒试样进行了直剪试验的模拟,分析了颗粒形状、颗粒数量、粒间摩擦对宏观剪切特性的影响。Powrie 等(2005)<sup>[58]</sup>用同样的方法生成非圆颗粒,并对平面应变试验进行了模拟,分析了加荷面粗糙度对剪切带形成的影响。这种通过黏结模型构造团聚颗粒的方法为非圆颗粒的开发提供了新的思路。

## 1.5 颗粒流方法及计算程序 PFC<sup>2D/3D</sup>

颗粒流方法(Particle Flow Code, PFC)属于颗粒离散元法的一种。其计算程序 PFC<sup>2D/3D</sup>的基本单元为纯圆颗粒单元(二维条件下为圆盘,三维条件下为圆球);其单元本身不可变形,但颗粒之间可以以“软”接触的形式相互叠合;其原理和求解过程与一般颗粒离散元方法相同。但颗粒流方法也有自己的特点和优势,例如颗粒流方法提供黏结模型以用于黏性土及节理岩体的力学性质模拟,提供了“团聚颗粒”方法(“CLUMP”方法)以用于构造非圆颗粒等。

PFC<sup>2D/3D</sup>由 Cundall 加盟的 ITASCA 公司开发,目前的最高版本为 v5.0。PFC<sup>2D/3D</sup>的雏形为 Cundall 和 Strack 基于 Fortran 语言开发的二维 BALL 程序和三维 TRUBAL 程序,PFC<sup>2D/3D</sup>开发了自身的内嵌语言 Fish。Fish 语言结构简单、可读性强、内置函数丰富,支持用户根据需要进行二次开发。

PFC 提供的接触本构模型在力学机理上可分接触型和黏结型两类。接触型是散体颗粒材料特有的作用形式,体现了单元间的接触应力与接触变形之间的关系,同时引入 Coulomb 摩擦准则考虑单元间的滑移。接触型本构模型反映了散体颗粒在接触点处的挤压和摩擦作用,常用于砂土的力学性质模拟。接触型本构模型又分线性接触刚度模型和非线性接触刚度模型(也即 Hertz-Mindlin 非线性接触刚度模型)。黏结型本构模型考虑将离散颗粒单元黏结起来,同时黏结可在一定的强度准则条件下断裂。PFC 提供的黏结模型分接触黏结

(contact bond)模型和平行黏结(parallel bond)模型两类。黏结型本构模型的应用将颗粒流方法拓展到求解连续介质及连续介质向非连续介质转化的力学问题,如混凝土损伤破坏、岩体裂纹扩展、砂土颗粒破碎等课题。

PFC 提供了局部阻尼(local damping)和黏性阻尼(viscous damping)这两种常用的细观阻尼机制,用于系统运动能量的耗散,以使系统在合理的计算步数内达到稳定状态。由于仅靠颗粒接触点处的滑动摩擦耗能很难使系统在合理的时步内达到稳定状态,所以在默认条件下,PFC 程序中使用局部阻尼(local damping)来加速系统几何能量的耗散。局部阻尼引起的阻尼力作用于颗粒上,其大小与作用于颗粒上的广义不平衡力大小成正比,方向与广义速度方向相反(局部阻尼系数 $\alpha$ 的默认值为0.7)。这种局部阻尼机制类似于结构动力学中的位移型滞变阻尼,其在每一加荷循环内的能量耗散独立于加荷速率,即阻尼与加荷频率无关,局部阻尼可以用于拟静力问题的数值模拟研究。黏性阻尼(viscous damping)相当于在颗粒之间法向与切向接触点处作用一对速度型的黏壶,用于颗粒接触点处的能量耗散,黏性阻尼的大小由临界阻尼比 $\beta$ 表征。当 $\beta=1$ 时,系统处于临界阻尼状态,此时系统力学响应的衰退最快;当 $\beta<1$ 时,系统处于欠阻尼状态;当 $\beta>1$ 时,系统处于过阻尼状态。黏性阻尼的大小与加荷速率有关,一般在研究颗粒间动态接触碰撞问题时使用。

PFC 中还提供了“团颗粒”方法以供非圆颗粒单元的二次开发,与由黏结模型构造非圆颗粒单元相比,该方法有以下两个显著优点:

(1)计算过程中不考虑组成非圆颗粒单元的各个纯圆颗粒之间的内部接触,加快了计算速度。

(2)组成非圆颗粒单元的各个纯圆颗粒之间可以无限度重叠而不产生接触力,从而可以不考虑非圆颗粒破裂问题。

关于团颗粒构建非圆颗粒的具体方法将在第2章中做详细介绍。

PFCv5.0 版本对非圆颗粒的构建、流-固耦合分析、PFC-FLAC 耦合分析等功能上进行了卓有成效的改进和提升,本节在此不再对上述功能做具体介绍,有兴趣的读者可以参阅 PFC 使用手册及相关参考文献。

## 1.6 本书的主要内容

本书的主要内容聚焦于颗粒离散元法在散粒砂土力学特性细观模拟中的应用。第2章将介绍离散元建模中需要注意的几个关键问题,包括数值试样的制备方法、细观参数的标定方法、数值试样的尺寸效应、边界条件的设定、细观组构的定量分析方法、非圆颗粒单元的构建等。第3章将介绍砂土三轴(双轴)试验细观模拟,着重针对福建标准砂三轴试验,分析了分别采用线性接触刚度模型和非线性接触刚度模型的适用性和参数标定,并且模拟了砂土的临界状态力学特性。第4章将介绍砂土直剪试验细观模拟,在砂土半模直剪试验宏观细观分析的基础上,分析了采用颗粒离散元法模拟直剪试验的建模方法,重点分析了试样应力-剪胀关系、细观组构各向异性演化等宏观细观规律。第5章将介绍砂土单剪试验细观模拟,重点讨论了主应力轴偏转条件下数值试样的强度与变形特性及其对应的细观组构规律,探讨了大主应力与大主应变增量之间的非共轴效应及非共轴应力-剪胀关系,进一步分析了初始颗粒定向引起的层理面效应对试样单剪力学特性的影响。第6章将介绍砂土振动液化细观模拟,分别介绍了常体积法和固-液耦合方法模拟砂土振动液化的建模思路,分析了初始组构影响砂土液化势的细观机理;并基于离心模型试验结果,对饱和砂土自由场地和饱和砂-

桩耦合体系的地震液化响应进行了三维细观模拟。第7章将介绍砂土-结构面相互作用细观模拟,利用大型直剪仪进行了砂土-结构面相互作用宏细观试验,并利用颗粒离散元法进行了砂土-结构面相互作用模拟,揭示了接触面剪应力、剪应变、孔隙率、颗粒位移等变化规律。第8章将介绍砂土颗粒破碎细观模拟,分别介绍了采用黏结颗粒模型方法和颗粒破碎准则方法模拟砂颗粒破碎的建模思路,并且通过一维压缩试验细观模拟,分析了颗粒破碎屈服应力与接触力、配位数等细观组构之间的宏细观关联。第9章将介绍离散-连续耦合分析方法及其应用,重点介绍了二维条件下 PFC-FLAC 耦合建模方法,并且介绍了耦合分析方法在螺旋挤扩桩、高填方加筋路堤以及土-结构物相互作用等岩土力学课题中的具体应用。

## 本章参考文献

- [1] Oda M. Initial fabrics and their relations to mechanical properties of granular materials[J]. Soils and Foundations, 1972, 12(1): 17-36.
- [2] Oda M, Konishi J. Microscopic deformation mechanism of granular material in simple shear [J]. Soils and Foundations, 1974a, 14(4): 25-38.
- [3] Oda M, Konishi J. Rotation of principal stresses in granular material during simple shear[J]. Soils and Foundations, 1974b, 14(4): 39-53.
- [4] Oda M. Co-ordination number and its relation to shear strength of granular material[J]. Soils and Foundations, 1977, 17(2): 29-42.
- [5] Oda M, Konishi J, Nemat-Nasser S. Experimental micromechanical evaluation of strength of granular materials: effects of particle rolling [J]. Mechanics of Materials, 1982, 1(4): 269-283.
- [6] Oda M, Nemat-Nasser S, Konishi J. Stress-induced anisotropy in granular masses [J]. Soils and Foundations, 1985, 25(3): 85-97.
- [7] Iwashita K, Oda M. Rolling resistance at contacts in simulation of shear band development by DEM[J]. Journal of Engineering Mechanics, ASCE, 1998, 124(3): 285-292.
- [8] Alshibli K A, Sture S, Costes N C, Frank M L, Lankton M R, Batiste S N, Swanson R A. Assessment of localized deformations in sand using X-ray computed tomography[J]. Geotechnical Testing Journal, ASTM, 2000, 23(3): 274-299.
- [9] Otani J, Mukunoki T, Sugawara K. Evaluation of particle crushing in soils using X-ray CT data [J]. Soils and Foundations, 2005, 45(1): 99-108.
- [10] Watanabe Y, Lenoir N, Otani J, Nakai T. Displacement in sand under triaxial compression by tracking soil particles on X-ray CT data [J]. Soils and Foundations, 2012, 52(2): 312-320.
- [11] Ng T T, Wang C M. Comparison of a 3-D DEM simulation with MRI data [J]. International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics, 2001, 25: 497-507.
- [12] Ng T T, Aube D, Altobelli S. Void distribution of sand specimens by MRI [C]// Proceedings of 15th ASCE Engineering Mechanics Conference, Columbia University, New York, 2002, 1-7.
- [13] Cil M B, Alshibli K A. 3D evolution of sand fracture under 1D compression [J]. Geotechnique, 2014, 64(5): 351-364.
- [14] White D J, Take W A, Bolton M D. Soil deformation measurement using particle image

- velocimetry (PIV) and photogrammetry[J]. *Geotechnique*,2003,53(7): 619-631.
- [15] 邵龙潭,孙益振,王助贫,等. 数字图像测量技术在土工三轴试验中的应用研究[J]. *岩土力学*,2006,27(1): 29-34.
- [16] 李元海,靖洪文,曾庆有. 岩土工程数字照相量测软件系统研发与应用[J]. *岩石力学与工程学报*,2006,25(S2): 3859-3866.
- [17] 张连卫,张建民,张嘎. 基于数字图像的粒状材料细观组构特征分析技术[J]. *岩土工程学报*,2008,30(10): 1555-1559.
- [18] 周健,史旦达,吴峰,等. 基于数字图像技术的砂土液化可视化动三轴试验研究[J]. *岩土工程学报*,2011,33(1): 81-87.
- [19] Bhandari A R, Powrie W, Harkness R M. A digital image-based deformation measurement system for triaxial tests[J]. *Geotechnical Testing Journal*,2012,35(2): 1-18.
- [20] Cundall P A, Strack O D L. A discrete numerical model for granular assemblies[J]. *Geotechnique*,1979,29(1): 47-65.
- [21] 史旦达,周健,刘文白,等. 砂土直剪力学性状的非圆颗粒模拟与宏细观机理研究[J]. *岩土工程学报*,2010,32(10): 1557-1565.
- [22] Shi D D, Xue J F, Zhao Z Y, Shi J Y. A DEM investigation on simple shear behavior of dense granular assemblies[J]. *Journal of Central South University*,2015,22(12): 4844-4855.
- [23] Cui L, O'Sullivan C, O'Neill S. An analysis of the triaxial apparatus using a mixed boundary three-dimensional discrete element method[J]. *Geotechnique*,57(10): 831-844.
- [24] Shi D D, Zheng L, Xue J F, Sun J. DEM modeling of particle breakage in silica sands under one-dimensional compression[J]. *Acta Mechanica Solida Sinica*,2016,29(1): 78-94.
- [25] Wang J F, Yan H B. On the role of particle breakage in the shear failure behavior of granular soils by DEM[J]. *International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics*, 2013,37: 832-854.
- [26] Zhou W, Yang L F, Ma G, Chang X L, Cheng Y G, Li D Q. Macro-micro responses of crushable granular materials in simulated true triaxial tests[J]. *Granular Matter*,2015,17(4): 497-509.
- [27] Cundall P A. A computer model for simulating progressive large scale movements in blocky rock systems [C]// *Proceeding of the symposium of the international society for rock mechanics*, Nancy,1971, vol I, No. 8.
- [28] 王泳嘉,邢纪波. 离散单元法在岩土力学中的应用[M]. 沈阳: 东北工学院出版社,1991.
- [29] Govender N, Rajamani R K, Koh S, Wilke D N. Discrete element simulation of mill charge in 3D using the BLAZE-DEM GPU framework[J]. *Mineral Engineering*,2015,79: 152-168.
- [30] O'Sullivan C. *Particulate Discrete Element Modelling: A Geomechanics Perspective*[M]. Taylor and Francis,2011.
- [31] Cundall P A. BALL-A program to model granular media using the distinct element method [R]. Technical Note, Advanced Technology Group, Dames & Moore, London, 1978.
- [32] De Josselin de Jong G, Verruijt A. Etude photo-élastique d'un empilement de disques[J]. *Cah. Grpe fr. Etud, RhPol*,1969,2,73-86.

- [33] Strack O D L, Cundall P A. Fundamental studies of fabric in granular materials [ R ]. Interim Report to National Science Foundation, NSF CEE-8310729, Department of Civil and Mineral Engineering University of Minnesota, Minneapolis, Minnesota, 1984.
- [34] Thornton C, Randall C W. Applications of theoretical contact mechanics to solid particle system simulations [ C ]// *Mechanics of Granular Materials*, Satake&Jenkins, eds, Elsevier Science Publishing, Amsterdam, Netherlands, 1988, 133-142.
- [35] 刘连峰. 弹塑性颗粒物质准静态变形的细观力学行为 [ J ]. *岩土工程学报*, 2007, 29(4) : 524-530.
- [36] Ng T T, Dobry R. CONBAL-simulated granular material using quartz spheres with the discrete element method [ R ]. Rensselaer Polytechnic Institute, Troy, New York, 1991.
- [37] Walton O R. Explicit particle dynamics model for granular materials [ C ]// *The 4th International Conference on Numerical Methods in Geomechanics*, 1982, 1261-1268.
- [38] Ting J M, Corkum B T, Kauffman C R, et al. Discrete numerical model for soil mechanics [ J ]. *Journal of Geotechnical Engineering*, ASCE, 1989, 115(3) : 379-398.
- [39] Bathurst R, Rothenburg L. Investigation of micromechanical features of idealized granular assemblies using DEM [ C ]// *Proceedings of 1st US Conference on Discrete Element Methods*, Golden, Colo, 1989.
- [40] Taylor L M, Preece D S. DMC-a rigid body motion code for determining the interaction of multiple spherical particles [ R ]. Sandia National Laboratories Report, SAND- 88-3482, 1989.
- [41] Bardet J P, Proubet J. JP2, a program to simulate the behavior of two-dimensional granular materials [ R ]. University of Southern California, LA. , 1989.
- [42] O' Sullivan C. The application of discrete element modelling to finite deformation problems in geomechanics [ D ]. Doctoral Dissertation, University of California, Berkeley, 2002.
- [43] Ting J M, Corkum B T. Strength behavior of granular materials using discrete numerical modeling [ C ]// *Numerical Methods in Geomechanics*, Innsbruck, 1988, 305-310.
- [44] Ng T T, Dobry, R. Numerical simulations of monotonic and cyclic loading of granular soil [ J ]. *Journal of Geotechnical Engineering*, 1994, 120(2) : 388-403.
- [45] Iwashita K, Oda M. Rolling resistance at contacts in simulation of shear band development by DEM [ J ]. *Journal of Engineering Mechanics*, ASCE, 1998, 124(3) : 285-292.
- [46] Jiang M J, Yu H S, Harris D. A novel discrete model for granular material incorporating rolling resistance [ J ]. *Computers and Geotechnics*, 2005, 32 : 340-357.
- [47] Zhao J D, Guo N. Rotational resistance and shear-induced anisotropy in granular media [ J ]. *Acta Mechanica Solida Sinica*, 2014, 27(1) : 1-14.
- [48] Ng T T. Numerical simulations of granular soil using elliptical particles [ C ]// *Microstructural Characterization in Constitutive Modeling of Metals and Granular Media*, ASME Summer Mechanics and Materials Conference, Tempe, Arizon, 1992, 95-118.
- [49] Rothenburg L, Bathurst R J. Micromechanical features of granular assemblies with planar elliptical particles [ J ]. *Geotechnique*, 1992, 42(1) : 79-95.
- [50] Sawada S, Pradhan T B S. Analysis of anisotropy and particle shape by distinct element



- method [ C ]// Proceedings of 8th International Conference for Computer Methods and Advances in Geomechanics, West Virginia University, Morgantown, 1994, 665-670.
- [51] Ting J M. An ellipse-based micromechanical model for angular granular materials [ C ]// Proceedings of ASCE Engineering Mechanics Specialty Conference, Columbus, OH, 1991, 1214-1218.
- [52] Lin X, Ng T T. A three-dimensional discrete element model using arrays of ellipsoids [ J ]. *Geotechnique*, 1997, 47(2) : 319-329.
- [53] Barbosa R, Ghaboussi J. Discrete finite element method [ J ]. *Engineering Computations*, 1992, 9(2) : 253-266.
- [54] Mirghasemi A A, Rothrnburg L, Matyas E L. Numerical simulations of assemblies of two-dimensional polygon-shaped particles and effects of confining pressure on shear strength [ J ]. *Soils and Foundations*, 1997, 37(3) : 43-52.
- [55] Matuttis H G, Luding S, Herrmann H J. Discrete element simulations of dense packings and heaps made of spherical and nonspherical particles [ J ]. *Powder Technology*, 2000, 109(1) : 278-292.
- [56] Jensen R P, Edil T B, Bosscher E P, Plesha M E, Kahla N B. Effect of particle shape on interface behavior of DEM-simulated granular materials [ J ]. *The International Journal of Geomechanics*, 2001, 1(1) : 1-19.
- [57] Ni Q, Powrie W, Zhang X, Harkness R. Effect of particle properties on soil behavior: 3-D numerical modeling of shear box tests [ C ]// *Numerical Methods in Geotechnical Engineering*, ASCE Geotechnical Special Publication No. 96, 2000, 58-70.
- [58] Powrie W, Ni Q, Harkness R M, Zhang X. Numerical modeling of plane strain tests on sands using a particulate approach [ J ]. *Geotechnique*, 2005, 55(4) : 297-306.

## 第2章 颗粒离散元细观建模中的几个重要问题

### 2.1 引言

正如第1章所述,颗粒离散元法自问世以来的应用实践表明,其是分析离散颗粒介质细观力学行为的有力工具。颗粒离散元法在分析颗粒集合体的颗粒流动特征、研究砂土的结构各向异性、揭示砂土的强度和变形机理等方面具有其他数值方法不可比拟的优势。但与其他数值方法特别是与有限元法相比,颗粒离散元法的发展还并不成熟,在接触本构模型及其细观参数的确定、数值试样的尺寸效应与边界条件、颗粒形状及其接触检索算法等细观建模方面,均有很多工作值得深入开展。

本章将结合文献资料和作者所做的工作,重点介绍颗粒离散元细观建模中需要读者注意的几个关键问题,包括数值试样的制备方法、数值试样的尺寸效应、数值试样的边界条件、细观参数的标定方法、细观组构的定量表述方法、非圆颗粒单元的构建等,以期能够给读者的数值建模工作提供借鉴与参考。因水平所限,关于建模方面的介绍不可能做到面面俱到,读者在使用相关程序时,可以结合文献资料查阅相关的程序手册。另外,徐泳等(2003)<sup>[1]</sup>、刘凯欣和高凌天(2003)<sup>[2]</sup>、O'Sullivan等(2006)<sup>[3]</sup>、孙其诚等(2011)<sup>[4]</sup>、Derakhshani等(2015)<sup>[5]</sup>、Paulick等(2015)<sup>[6]</sup>都曾从不同角度对颗粒离散元法的发展和應用做过评述,在这些评述论文中也对离散元细观建模给出了很好的建议,读者可以参阅这些资料。

### 2.2 数值试样的制备方法

颗粒离散元提供了多种灵活的颗粒试样建模方法,各种方法都有各自的优缺点,读者应根据研究课题的不同需求进行选择。半径膨胀法(radius expansion)是最为常用的试样制备方法。半径膨胀法的优势是可以快速生成指定初始孔隙率的数值试样;缺点是由于膨胀后颗粒之间存在一定的初始叠合量,制备出的试样内部会有一定量的初始应力,这对于初始应力敏感问题的数值建模需谨慎使用。边界墙移动法(wall moving)是一种可以替代半径膨胀法的有效建模方法。这种方法可以减小试样内部的初始应力,并且可以通过设置不同的颗粒摩擦系数,来制备指定初始围压条件下不同初始密度的试样<sup>[7]</sup>;这种方法对于密实试样的制备较为有效,而对于松散试样,由于边界墙为一个指定的压力边界或速度边界,容易造成边界处与中心位置试样孔隙率分布的不均匀。为了模拟室内试验中空中雨砂法制备砂样,数值模拟中可以对应的采用重力沉积法(gravity deposit),但重力沉积法的缺点是比较耗时。由于重力沉积过程中不同深度试样的孔隙率分布不均匀,因此很难制备出完全均质的数值试样。针对重力沉积法的这一缺陷,蒋明镜等(2003)<sup>[8]</sup>提出了分层压实制样方法(multi-layer with undercompaction method),这种方法可以制备出均质的数值试样,且适用于从松到密等不同初始密度要求。Lai等(2014)<sup>[9]</sup>进一步改进了分层压实制样方法,并将其用于室