

# 颗粒形状模拟的离散元法在岩土工程中的研究进展与应用

王一雄

西京学院陕西省混凝土结构安全与耐久性重点实验室, 陕西 西安

收稿日期: 2026年4月11日; 录用日期: 2026年5月2日; 发布日期: 2026年5月12日

## 摘要

颗粒离散元法是一种基于牛顿运动定律的数值模拟技术, 专门用于研究由离散颗粒组成的材料的力学行为和动态演化过程。随着计算条件的不断发展, 颗粒离散元法在岩土工程数值分析中已有一定应用。在真实条件下, 颗粒形状往往较为复杂, 因此对复杂颗粒形状的模拟在研究岩土颗粒材料物理力学特性中至关重要。本文系统阐述了考虑颗粒形状的离散元法(DEM)在岩土工程中的研究进展与应用现状。剖析散粒体材料的复杂力学特性, 点明传统连续体力学方法的局限之处, 着重突出离散元法在揭示颗粒材料宏观力学机制方面的优势。文章重点探讨了颗粒形状的模拟方法: 典型形状模拟(通过参数化方法量化球形度、长细比等)与真实形状模拟(基于三维扫描与数学重构技术), 总结了两种方法在机理研究、复杂应力路径模拟及多尺度耦合分析中的应用成果。同时, 揭示了当前存在的关键问题, 包括颗粒形状分类标准缺失、真实形状建模的计算效率与精度矛盾、参数标定复杂等。未来研究需结合大数据与算法优化提升计算效率, 并深化颗粒形状对加卸载过程力学响应的影响机制, 以推动离散元法在岩土工程中的实际应用。

## 关键词

岩土工程, 离散元法, 数值模拟, 颗粒形状

# Research Progress and Application of Discrete Element Method for Particle Shape Simulation in Geotechnical Engineering

Yixiong Wang

Shaanxi Key Laboratory of Safety and Durability of Concrete Structures, Xijing University, Xi'an Shaanxi

Received: April 11, 2026; accepted: May 2, 2026; published: May 12, 2026

## Abstract

Particle discrete element method is a numerical simulation technique based on Newton's laws of motion, specifically used to study the mechanical behavior and dynamic evolution process of materials composed of discrete particles. With the continuous development of computational conditions, the particle discrete element method has been applied to numerical analysis of geotechnical engineering. Under real conditions, particle shapes are often complex, so simulating complex particle shapes is crucial in studying the physical and mechanical properties of geotechnical granular materials. This article systematically elaborates on the research progress and application status of Discrete Element Method (DEM) considering particle shape in geotechnical engineering. By analyzing the complex mechanical properties of granular materials, the limitations of traditional continuum mechanics methods are pointed out, and the advantages of discrete element method in revealing the macroscopic and microscopic mechanical mechanisms of granular materials are emphasized. The article focuses on the simulation methods of particle shape: typical shape simulation (quantifying sphericity, aspect ratio, etc. through parameterization methods) and real shape simulation (based on 3D scanning and mathematical reconstruction techniques), and summarizes the application results of the two methods in mechanism research, complex stress path simulation, and multi-scale coupling analysis. At the same time, key issues that currently exist were revealed, including the lack of particle shape classification standards, the contradiction between computational efficiency and accuracy in modeling real shapes, and the complexity of parameter calibration. Future research needs to combine big data and algorithm optimization to improve computational efficiency, and deepen the influence mechanism of particle shape on the mechanical response of loading and unloading processes, in order to promote the practical application of discrete element method in geotechnical engineering.

## Keywords

Geotechnical Engineering, DEM (Discrete Element Method), Numerical Simulation, Particle Shape

Copyright © 2026 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

## 1. 引言

岩土工程中广泛分布的散粒体材料(如粗粒土、砂土等)具有复杂的物理力学特性,其力学行为受颗粒形状、接触模式及细观结构等多因素共同调控。传统连续体力学理论基于连续介质假设,虽能描述材料的宏观应力-应变响应,却难以揭示颗粒间的离散性相互作用机制,尤其在分析应变软化、应力路径依赖性及非均匀变形等问题时存在显著局限性[1]。随着计算机技术与数值模拟方法的进步,离散元法(Discrete Element Method, DEM)因其能够从细观尺度刻画颗粒运动与接触力链演化,逐渐成为研究散粒体材料力学特性的重要工具[2]。然而,自然界中颗粒形态的多样性与不规则性对离散元建模提出了严峻挑战,如何精确表征颗粒形状及其对宏观力学行为的影响,成为提升数值模拟真实性与工程适用性的关键问题。

自1930年代初期,学术界开始认识到,颗粒几何形态对土壤力学性质有显著影响。以颗粒的尖角和表面质感为例,它们通过摩擦力、咬合力和嵌锁效应,显著提升了土壤的抗剪强度[3] [4]。Cundall等[5]于1979年提出离散元法后,研究者围绕颗粒形状模拟开展了系统性探索,形成了以典型形状参数化(如

球形度、长细比)和三维扫描重构为核心的两类方法[6]-[9]。前者通过简化几何模型探究形状参数的宏观关联,后者基于高精度成像技术还原真实颗粒形态,两者在揭示颗粒形状对堆积密度、剪切带演化及多尺度耦合行为的影响方面取得重要进展[10]-[12]。然而,现有方法仍面临形状分类标准缺失、计算效率与精度矛盾等瓶颈,限制了其在复杂工程场景中的应用。

本文旨在系统综述考虑颗粒形状的离散元法在岩土工程中的研究进展,通过梳理颗粒形状模拟方法的理论框架与应用案例,对比分析典型形状参数化与真实形态重构技术的优势与不足,并探讨其在多物理场耦合、参数标定及工程优化中的潜在价值。研究不仅可为深化散粒体材料宏观力学机制的理解提供理论支撑,还可为提升离散元法在边坡稳定、地基加固及地质灾害防治等工程实践中的预测精度与适用性提供技术参考,具有重要的学术意义与工程应用前景。

## 2. 颗粒形状模拟的离散元方法

### 2.1. 典型形状参数化法分析

在当前的模拟技术领域,球形度、长细比、棱角角度等形状参数的定义已成为主流方法。通过这些参数,能够构建出规则的三维几何体,例如椭球体和多面体,亦或是一组由“簇”(Clump)所构成的颗粒组合。这种方法最初主要用于对颗粒形状的一般描述,但随着技术的进步,它已演变为能够通过形状参数对颗粒形状进行精确量化的技术。通过这种方法对颗粒形状进行的量化分析,再与圆形颗粒进行比较,能够简单而又高效地探究颗粒形状与其在宏观和微观尺度上的参数之间的关系。这种方法特别适用于研究形状参数对颗粒力学特性的定量影响,并对其进行机制分析。赵仕威等[13]通过构建具有不同棱角度的对称多面体颗粒,利用一种既简单又适用于任何颗粒形状的接触本构模型,研究了颗粒棱角角度在模拟直剪试验中的影响,以及接触力在剪切过程中的各向异性演化规律。张成功等[7]运用三维离散元方法,针对圆柱形粒料试样的坍塌破坏机制进行模拟分析。研究聚焦于由不同形态颗粒构成的圆柱形粒料试样,探讨了其最终的坍塌高度及跑出距离。此外,还对比了离散元模拟与室内试验的结果,发现离散元方法能有效再现室内粒状材料圆柱形粒料试样坍塌过程。史旦达等[16]使用离散元模拟平台 PFC3D,建立空心圆柱形状的数值试样。研究着重于分析在压-剪复合应力条件下,非球形颗粒材料所构成的数值试样的宏观及微观力学响应。此外,还探讨了颗粒的形状和围压对数值试样初始变形模量、抗剪强度、剪切带倾角以及组构各向异性演化的影响。周光军等[15]通过开展一系列砂-砾石混合物的离散元数值模拟研究,探讨了砾石颗粒形状以及砾石的含量对砂-砾石混合物宏观力学特性的影响,以及砾石颗粒形状和砾石含量对砂-砾石混合物力学特性产生影响的微观机理。颗粒形状的量化方法经历了一系列的发展逐渐变得成熟,但量化参数却缺乏工程统一的应用标准。有不少学者采用轴向系数、长细比[16]、扁平度[17]、磨圆度[18]等参数对颗粒形状进行表征取得了不少研究成果但不同形状量化参数适用的工况缺乏统一的标准,导致同一工况下不同学者研究不同的颗粒形状参数,彼此之间的联系与参考价值有所影响长此以往不利于此领域的发展。王家全等[19]通过调整 Clump 颗粒中嵌入球体直径,精确控制球形度并保持体积恒定。林呈祥等量化月壤颗粒凹凸度,揭示了表面形貌对抗剪强度的增强效应。魏婕等通过随机排列的 Clump 颗粒,对比研究了非对称颗粒与球形颗粒在接触网络上的差异。杨升等利用 Clump 命令成功创建了椭圆形和哑铃形颗粒模型。他们分析了不同形状颗粒的配位数变化、体积变化以及空间转动特性,揭示了形状对配位数及体积变化等微观调控机制的深刻影响。

### 2.2. 真实形态重构法分析

在颗粒形状模拟的领域中,真实形态重构法占据主导地位。这种技术依托于三维扫描技术、CT 成像技术,以及如球谐函数和傅里叶描述符等数学工具[20],以实现颗粒真实轮廓的精确还原。具体操作包括

使用扫描设备捕捉颗粒的外部轮廓,然后通过圆形颗粒填充外部轮廓以及运用数学方程重构颗粒形态,最终达到模拟颗粒真实形状的目标。王舒永等[21]利用三维扫描构建土石混合体模型。林春江等通过显微观测,考虑颗粒形态效应,对尾矿颗粒进行一系列离散元模拟。通过CT扫描与图像处理技术,研究3组不同围压下真实颗粒试样与圆颗粒试样的液化特征。在检测实际颗粒样本的动孔压时,观察到其在低围压条件下的变化从“快速-平稳”演化为高围压条件下的“快速-平稳-缓慢”的模式。此外,动应变的演变也呈现出变化,从低围压时的“喇叭形状”发展成高围压条件下的“号角形状”。华文俊等通过开展不同竖向应力水平下的大型直剪试验,研究级配和颗粒形状对堆积体填料剪切性能的影响规律,进而构建基于真实颗粒形状的堆积体填料直剪试验的离散元模型。程壮等构建了一个离散元模型,该模型模拟了考虑钙质砂颗粒的真实形状及破碎过程的情况。在二维剪切条件下,该模型分析了试样的宏观及微观力学行为。同时,探讨了颗粒形状、粒径大小、颗粒强度以及水泥胶结强度等因素对胶结钙质砂力学行为影响的规律性。程晓颖等运用三维激光扫描设备,成功获取了碎石颗粒表面的点云坐标。通过对这些数据的处理和分析,团队重构了碎石颗粒的几何形态。在此基础上,他们应用基于能量守恒和接触理论的多面体离散元法,详细描述了碎石颗粒间的相互作用及其运动规律。吴琪等研究了三维尺寸和棱角系数的均值、标准差和统计分布,采用多面体和棱角系数共同描述了砂砾土颗粒三维形态,基于PFC3D(Particle Flow Code)颗粒流离散元计算程序,提出了砂砾土颗粒三维形态的离散元生成算法。

### 3. 颗粒形状的宏观力学效应

#### 3.1. 宏观机制分析

离散元法,作为一种细观力学分析方法,其核心在于将散粒体介质的力学响应问题,从传统物理领域成功迁移至数学领域,进而通过数值方法加以求解。它可以有效地模拟这种多尺度的特性,并被广泛地应用于认识岩土体宏观力学特性的微观机制,也就是宏观机制研究。尽管目前对散粒体材料力学机制的解析主要还是基于定性分析,但也有学者提出了定量关系确定的方法。例如,基于细观参数的统计模型,这些方法为构建本构模型提供了重要的理论支持。张玲等对碎石-黏土界面行为进行了深入研究,他们利用数值三轴试验,探讨了筋材开孔率与抗拉刚度对界面摩擦特性的协同作用。李恒等运用PFC2D构建层状复合岩层离散元模型。通过细观参数的校准和宏观特性的验证,研究并分析了平行双裂隙复合岩层的岩桥倾角和层理倾角对力学特性和破坏模式的影响。闫洪超及其团队运用直剪试验模拟技术,并结合杨升等人的研究,深入探讨了颗粒初始配位数与内摩擦角之间的非线性联系。在此基础上,他们通过引入Hertz接触理论,构建了一个关联模型,该模型能够普遍描述砂土在宏观尺度上的力学参数。徐小敏等通过三轴模拟研究了颗粒刚度比与宏观弹性参数(如杨氏模量、泊松比)的定量关联,揭示了细观接触刚度对材料整体变形特性的主导机制。进一步深化了颗粒间相互作用对宏观力学特性影响的研究。此外,刘勇等结合粗粒土室内试验与离散元参数标定,明确了颗粒间摩擦系数、细观连接强度及孔隙率对宏观力学特性的耦合影响规律。王怡舒等通过变摩擦系数组合的三轴模拟,阐明了滑动摩擦与滚动摩擦对颗粒体系能量耗散及变形模式的差异化贡献。在真实颗粒形态建模方面,王舒永等基于三维扫描技术构建了含石量梯度变化的土石混合体模型,从微观接触力链演化角度解析了剪切变形机制,并建立了宏观参数间的经验方程。张家伟等[22]利用离散元生成多裂隙岩体模型,定量揭示了裂隙密度与岩石损伤演化的非线性规律。路德春等[23]通过隐式方程建立了组构张量与应变张量的定量映射关系,为多尺度本构理论的发展提供了新思路。上述研究不仅深化了对散粒体材料力学机制的理解,也为离散元法从理论走向工程实践奠定了重要基础。

#### 3.2. 颗粒形状参数的量化表征与宏观关联

颗粒形状的量化表征是离散元建模的核心环节,常用参数包括几何形态参数(如球形度、棱角度)与力

学效应参数(如接触摩擦角、滚动阻力系数)。刘清秉等通过球形度与内摩擦角的关联分析,揭示了非规则颗粒对土体抗剪强度的增强机制;周光军等则结合砾石长宽比与含量分布,建立了砂-砾石混合物剪切强度的预测模型。然而,当前缺乏统一的形状分类标准与参数标定方法,导致不同研究间的可比性受限。未来需结合机器学习与大数据技术,构建颗粒形状-力学响应的多尺度映射数据库,推动参数标定的智能化发展。程耀飞等对粉砂土的结构进行简化,将其描述为一种由粗粒子和细粒子组成的二元混合介质。随后,通过离散元数值模拟,对固结排水剪切试验进行了深入探讨。研究发现,在微观和宏观尺度上,细粒含量的变化对粉砂二元介质混合物的初始堆积状态、峰值强度和残余强度产生显著影响,同时揭示了与细观力学机制相关的变化规律。刘润等通过离散元模拟采用重叠刚性簇方法研究了颗粒角度和颗粒球度对碎石土宏观和微观力学特性的影响。建立了相同孔隙比条件下不同颗粒形状的碎石土三轴试验数值模型,探讨了内摩擦角、体应变、力学配位数、组构及接触力链的演化。华文俊等通过开展不同竖向应力水平下的大型直剪试验,研究了级配和颗粒形状对堆积体填料剪切性能的影响规律,建立颗粒微细观参数与堆积体填料宏观剪切行为之间的关联机制。王一伟等通过运用抗转线性接触模型,对室内密实砂土进行的三轴试验进行了离散元模拟。这一研究进一步验证了抗转线性接触模型的准确性。此外,研究深入探讨了颗粒间摩擦系数、刚度比和抗转动系数等微观参数与砂土的内摩擦角、残余内摩擦角、剪胀角等宏观参数之间的联系,并通过验证确定了它们之间的量化关系,进而建立了该模型在宏观与微观参数间的量化关系模型。井旭等基于电镜扫描获取细观颗粒信息,同时考虑颗粒形状、颗粒破碎可能性进行建模的离散单元法进行原状黄土和饱和重塑土在恒定应变速率双轴试验下的宏观力学和细观力学性能研究,使用该建模方法有效反映了原状及重塑黄土由于内部结构组成差异导致产生的不同内部应力状态。将明镜等研究了颗粒定向排列导致的初始各向异性对净砂力学特性的影响,采用自编的离散元软件生成4种不同沉积方向的椭圆颗粒净砂样,并分别对4种试样进行双轴压缩试验,将离散元模拟结算与室内试验结果进行对比确定该方法的可行性,通过分析模拟结果研究沉积方向所产生的影响。

#### 4. 复杂应力路径下的力学响应分析

实际工程中,散粒体材料常承受许多客观存在的三维复杂应力作用,这些应力作用常规物理试验往往无法还原。离散元数值试验方法简便地模拟复杂应力路径,灵活调整主应力方向与幅度,阐明颗粒形状如何影响应力路径敏感性,并揭示复杂应力路径下散粒体材料力学性质的变化规律。姚兆明等[24]构建了两组模拟交通荷载的加载方程,通过动态空心圆柱剪切仪模拟了各种复杂应力路径加载模式,推导了恒定主应力偏转角循环加载方程和常广剪应力主应力轴循环加载方程。李栋伟[25]等采用应力路径试验方法,模拟了人工冻结法凿井井架地基施工变化过程;以元件模型为基础,通过推导获得了冻砂土非线性流变本构力学模型。陈生水等[26]针对无粘性土,基于标准砂和粉煤灰两种典型材料,通过试验研究了应力路径下的应力应变特性。基于此,他们提出了一种适用于无粘性土的弹塑性数值模型。薛龙等[27]开发了一种三轴复杂应力加载系统,该系统能够通过三个主应力大小和方向的任意控制来模拟实际的应力状态。该系统能够成功模拟颗粒体系在循环加卸载条件下的接触力链演化过程以及能量耗散规律。刘嘉英等[28]通过实施真三轴应力路径模拟实验,深入剖析了加载进程中微观与宏观力学参数演进的动态过程。此外,他们对组构张量与应力张量之间的关系进行了详尽的阐述。研究结果显示,在剪切过程中,非球形颗粒由于几何锁定效应,其组构各向异性显著增强,进而导致应力-应变曲线呈现出明显的非线性特征。李涛等[29]为探究结构性土粒间胶结的关键特征,建立了多种应力路径下的离散元数值分析,揭示了颗粒胶结形态在复杂应力路径下的渐进破损机制。郝晓平通过对砂岩试件进行试验研究,深入探讨了在不同应力路径作用下,砂岩的宏观应力-应变特性及其细观接触力的空间分布特征。研究发现,在砂岩试样破坏的临界状态下,峰值应力和体积应变与围压之间存在显著的关联性。尽管现有研究已初步

阐明颗粒形态对应力路径依赖性的调控作用，但对多场耦合(如渗流 - 力学耦合)条件下颗粒行为的模拟仍存在技术瓶颈，需进一步发展高效算法与高精度接触模型。

## 5. 多物理场耦合中的集成应用分析

在环境地质灾害、第三方施工扰动等复杂荷载作用下，基坑、管道及桩基等结构的宏观变形与散粒体细观力学行为的耦合分析，需综合考虑结构 - 土体 - 流体间的多物理场相互作用。离散元法(DEM)因其在模拟土体分层、大变形、流变及颗粒迁移等方面的独特优势，常与有限元法(FEM)、计算流体力学(CFD)等数值方法耦合，形成跨尺度、多场协同的高效模拟框架。此类耦合方法不仅显著提升了计算效率与模拟精度，还为复杂岩土工程问题的精细化分析提供了新路径。程宏昉等基于粗粒化(CG)理论，提出了有限元 - 离散元(FEM-DEM)耦合的表面与体积统一表达式。表面耦合通过 CG 将颗粒 - 单元接触力扩展至相邻积分点，体积耦合则将颗粒运动均匀化到宏观单元。刘嘉等基于多尺度土体模型，提出了考虑颗粒转动的多尺度理论，并开发了耦合有限元程序，用于模拟地基塑性区深度的演变规律。禹海涛等基于 DEM-FDM 耦合模型，模拟了隧道开挖对近断层错动带的扰动效应，从细观接触力链演化角度阐明了围岩损伤扩展的物理机制。高涛等采用 DEM-FDM 跨尺度耦合技术，系统研究了桩土接触过程中桩体下沉诱发的土体细观变形与应力重分布规律，揭示了桩端阻力与侧摩阻力协同作用下的失稳机制。在杨江坤等研究者的深入研究下，一项三维 DEM-FDM 耦合技术被应用于建立分离式霍普金森压杆(SHPB))冲击模型。这一创新为研究岩石在动态破碎过程中能量耗散与裂纹网络间的相互关系，提供了全新的研究视角。针对渗流 - 力学耦合问题，熊书春等通过优化 CFD-DEM 算法，实现了非球形大颗粒在流场中运动轨迹的高效模拟，并利用粘结颗粒模型提升了多相流耦合计算的稳定性。李伟一等利用 CFD-DEM 方法，揭示了间断级配砂土渗流侵蚀过程中颗粒形状对孔隙结构演化的控制作用，建立了渗透系数与细观颗粒流失率的定量关系。徐汪豪等则创新性地引入刚体动力学(RBD)-DEM 耦合方法，模拟了复合地层中盾构滚刀的动态被动转动行为，为刀具 - 岩土界面相互作用机理的工程化分析提供了高精度数值工具。上述耦合技术的应用，不仅深化了对岩土材料宏细观力学行为的理解，也为工程灾害防控与智能化施工提供了理论支撑。

## 6. 工程应用存在的问题

在岩土工程研究领域内，随着研究与应用需求的日益细致与复杂，离散元法的理论研究及数值计算软件的技术进步，均推动了离散元法在模拟考虑颗粒形状方面的进步。但总体来说，颗粒离散元法偏向于学术研究居多，在工程中的大规模应用还相对较少，面临诸多挑战。

(1) 形状分类标准尚未完善，参数标定存在难题。目前，工程领域缺乏统一的颗粒形状分类标准，导致不同研究成果之间难以直接对比。各类形状量化参数(如球形度、长细比等)在不同工况下的适用性尚无明确界定，使得研究者在选择参数时存在困惑。此外，离散元模拟中的参数标定极为复杂，无论是通过试错法还是现场试验法，都需要耗费大量的时间和精力。由于岩土材料性质的多样性和复杂性，很难找到一套通用的参数标定方法，这限制了离散元法在实际工程中的快速应用。

(2) 真实形状建模的效率与精度存在矛盾。真实形态重构法虽能更准确地模拟颗粒实际形状，但面临计算效率与精度的矛盾。基于三维扫描和 CT 成像技术获取颗粒形状信息时，设备成本高昂，扫描过程耗时较长，且对试样尺寸和形状有一定限制。同时，扫描数据处理过程复杂，边界搜索算法存在误差，影响了颗粒表面积、表面曲率等关键形态参数的精确测定。利用数学函数(如球谐函数、傅里叶描述符)模拟真实形状时，对使用者的专业知识和技能要求较高，且对于内凹型等复杂颗粒形状的模拟效果不佳，难以满足实际工程中对各种复杂颗粒形状精确模拟的需求。

(3) 大规模模拟的计算资源瓶颈。实际岩土工程问题往往涉及大量颗粒单元,对于模拟大型地基、边坡工程时,一次模拟可能需要处理数百万甚至数千万个颗粒。考虑颗粒形状的离散元模拟计算量巨大,对计算机硬件性能要求极高。即使采用并行计算技术,模拟过程仍可能耗费数小时甚至数天,严重影响了工程分析的时效性。在提升计算效率的同时,还需保证模拟精度,如何在有限的计算资源下实现高效、精确的模拟,是亟待解决的问题。

(4) 多物理场耦合模拟相对复杂。岩土工程中,土体常与渗流、温度、应力等多种物理场相互作用。虽然离散元法与其他数值方法(如有限元法、计算流体力学等)的耦合为多物理场模拟提供了思路,但目前耦合模型还不够完善。不同物理场之间的相互作用机制复杂,在模型构建和参数设置上存在诸多困难,导致模拟结果的准确性和可靠性有待提高。例如,在渗流-力学耦合模拟中,如何准确描述流体与颗粒之间的相互作用力、颗粒在渗流作用下的迁移规律等,仍需进一步研究。

## 7. 结论与展望

离散元法在岩土颗粒材料数值分析中已得到了一定的应用,尤其在机制分析、复杂应力路径模拟和多尺度耦合研究方面。颗粒的形貌特征对土体力学性质产生影响已经得到了学者们的普遍认同,并取得一定的研究成果。

### 7.1. 结论

(1) 通过典型形状参数化法(如球形度、长细比)与真实形态重构法(基于三维扫描、球谐函数),实现了对颗粒形状的量化表征与高精度模拟。典型形状参数化法因其高效性成为机理研究的主流方法,而真实形态重构法在复杂形状模拟中展现出独特优势。

(2) 模拟颗粒典型形状的方法模拟门槛较低,可便捷生成量化后的颗粒形状,适用于机理研究,但其量化参数缺乏统一工程应用标准。近年来,模拟真实形状的方法已可应用于小规模工程,能更真实地反映散粒体实际情况,但面临参数选取困难、误差不可避免以及计算效率与精度矛盾等问题。

(3) 研究揭示了颗粒形状对土体抗剪强度、接触力链演化、剪切带形成等力学特性的调控规律。强调了离散元法在多物理场耦合(如渗流-力学、热-力耦合)与多尺度分析(如 DEM-FEM 跨尺度建模)中的应用,为边坡稳定、隧道开挖、桩土相互作用等复杂工程问题提供了精细化分析工具。

### 7.2. 展望

(1) 基于大数据与深度学习的智能参数标定,当前离散元模拟最大的瓶颈在于微观参数(如接触刚度、摩擦系数、滚动阻力)难以直接测量,通常依赖繁琐的“试错法”。未来的研究应致力于构建“宏观-微观”映射的智能数据库。具体路径:利用机器学习(如随机森林、神经网络)处理海量的室内试验数据与模拟数据,训练能够直接从宏观力学指标(如三轴试验的应力-应变曲线)反演微观参数的代理模型。预期效果:实现参数标定的自动化与智能化,大幅降低对工程师经验的依赖,解决“参数标定复杂”的难题。

(2) 面向大规模真实形状模拟的算法优化,真实形状(如多面体、Clump 颗粒)虽然精度高,但计算成本呈指数级上升,限制了其在大型边坡或地基工程中的应用。具体路径:结合 GPU 并行计算与降阶模型(Reduced Order Modeling, ROM)技术。利用神经网络对复杂的颗粒接触力进行“学习”和“预测”,用计算速度快的 AI 代理模型替代部分耗时的物理接触计算。预期效果:在保持精度的前提下,将计算效率提升数个数量级,解决“计算效率与精度矛盾”的问题,使亿级颗粒的真实形状模拟成为可能。

(3) 加卸载过程与动态演化的深度机制研究,目前对颗粒形状的研究多集中于静力或单调加载过程,而岩土工程(如地震、交通荷载、基坑开挖)常涉及复杂的加卸载循环。具体路径:深入探究不同形状颗粒

(特别是棱角状颗粒)在循环加卸载下的咬合 - 滑移 - 破碎全过程。建立颗粒形态参数(如球形度、棱角度)与能量耗散机制(滞回圈面积)之间的定量数学模型。预期效果:揭示颗粒形状在疲劳损伤和长期蠕变中的微观机理,为动力机器基础和抗震设计提供更准确的理论依据。

(4) 多物理场耦合模型的精细化与标准化,针对渗流 - 力学、热 - 力耦合等复杂场景,现有的耦合模型往往简化了颗粒形状的影响。具体路径:发展高保真 CFD-DEM 耦合算法,精确描述非球形颗粒周围的流体绕流场。同时,亟需建立统一的颗粒形状分类标准(如基于形状参数的聚类分析),制定不同工程场景(如粗粒土、尾矿砂)对应的推荐参数表。预期效果:提高模型在泥石流模拟、冻土工程及深海采矿等复杂环境下的预测可靠性,推动离散元法从“科研软件”向“行业标准”迈进。

## 参考文献

- [1] 刘泉声, 刘学伟. 多场耦合作用下岩体裂隙扩展演化关键问题研究[J]. 岩土力学, 2014, 35(2): 305-320.
- [2] 王泳嘉. 离散元法及其在岩石力学中的应用[J]. 金属矿山, 1986(8):13-17+5.
- [3] Wadell, H. (1932) Volume, Shape, and Roundness of Rock Particles. *The Journal of Geology*, **40**, 443-451. <https://doi.org/10.1086/623964>
- [4] Riley, N.A. (1941) Projection Sphericity. *SEPM Journal of Sedimentary Research*, **11**, 94-95. <https://doi.org/10.1306/d426910c-2b26-11d7-8648000102c1865d>
- [5] Cundall, P.A. and Strack, O.D.L. (1980) Discussion: A Discrete Numerical Model for Granular Assemblies. *Géotechnique*, **30**, 331-336. <https://doi.org/10.1680/geot.1980.30.3.331>
- [6] Ting, J.M., Meachum, L. and Rowell, J.D. (1995) Effect of Particle Shape on the Strength and Deformation Mechanisms of Ellipse-Shaped Granular Assemblages. *Engineering Computations*, **12**, 99-108. <https://doi.org/10.1108/02644409510799497>
- [7] 张成功, 尹振宇, 吴则祥, 等. 颗粒形状对粒状材料圆柱塌落影响的三维离散元模拟[J]. 岩土力学, 2019, 40(3): 1197-1203.
- [8] 宋二祥. 堆石料颗粒形状对堆积密度及强度影响的离散元分析[J]. 岩土力学, 2019, 40(6): 2416-2426.
- [9] Zhao, B., Wang, J., Coop, M.R., Viggiani, G. and JIANG, M. (2015) An Investigation of Single Sand Particle Fracture Using X-Ray Micro-Tomography. *Géotechnique*, **65**, 625-641. <https://doi.org/10.1680/geot.4.p.157>
- [10] Zhao, B. and Wang, J. (2016) 3D Quantitative Shape Analysis on Form, Roundness, and Compactness with Mct. *Powder Technology*, **291**, 262-275. <https://doi.org/10.1016/j.powtec.2015.12.029>
- [11] Santamarina, J.C. and Cho, G.C. (2004) Soil Behaviour: The Role of Particle Shape. In: *Advances in Geotechnical Engineering: The Skempton Conference*, Emerald Publishing Limited, 604-617. <https://doi.org/10.1680/aigevl.32644.0035>
- [12] Rousé, P.C., Fannin, R.J. and Shuttle, D.A. (2008) Influence of Roundness on the Void Ratio and Strength of Uniform Sand. *Géotechnique*, **58**, 227-231. <https://doi.org/10.1680/geot.2008.58.3.227>
- [13] 赵仕威, 周小文, 刘文辉, 等. 考虑颗粒棱角影响的直剪试验的离散元模拟[J]. 岩土力学, 2015, 36(S1): 602-608.
- [14] 史旦达, 王威, 薛剑峰, 等. 压-剪复合应力下非球形颗粒材料空心圆柱剪切试验的离散元模拟[J]. 水利学报, 2019, 50(9): 1052-1062.
- [15] 周光军, 徐慧, 何先宇, 等. 考虑砾石颗粒形状及含量影响的砂-砾石混合物离散元模拟直剪试验[J]. 科学技术与工程, 2022, 22(27): 12084-12093.
- [16] 杨升, 李晓庆. 考虑不同颗粒形状的 PFC(3D)砂土直剪试验模拟研究[J]. 水利水电技术, 2019, 50(3): 139-144.
- [17] 闫洪超, 鲁杰, 饶振兴, 等. 描述砂性土宏观细观力学关系的数学模型[J]. 科学技术与工程, 2022, 22(2): 660-665.
- [18] 徐小敏, 凌道盛, 陈云敏, 等. 基于线性接触模型的颗粒材料细-宏观弹性常数相关关系研究[J]. 岩土工程学报, 2010, 32(7): 991-998.
- [19] 王家全, 陈亚菁, 陆梦梁, 等. 砂土堆积试验的组合 Clump 颗粒离散元模拟[J]. 广西大学学报(自然科学版), 2016, 41(4): 1131-1138.
- [20] 王怡舒, 刘斯宏, 沈超敏, 等. 接触摩擦对颗粒材料宏观细观力学特征和能量演变规律的影响[J]. 岩石力学与工程学报, 2022, 41(2): 412-422.
- [21] 王舒永, 张凌凯, 陈国新, 等. 基于三维扫描技术的土石混合体离散元模型参数反演及直剪模拟[J]. 材料导报, 2021, 35(10): 10088-10095.

- [22] 张家伟, 刘向君, 熊健, 等. 含裂缝页岩在围压下力学特性及破坏模式[J]. 科学技术与工程, 2023, 23(17): 7300-7309.
- [23] 路德春, 张世浩, 田雨, 等. 等应力比加载下颗粒材料的宏细观定量关系探讨[J]. 北京工业大学学报, 2021, 47(7): 728-735.
- [24] 姚兆明, 毛芬, 李哲, 等. 动态空心圆柱剪切仪模拟复杂应力路径能力[J]. 长安大学学报(自然科学版), 2012, 32(5): 71-78.
- [25] 李栋伟, 崔灏, 汪仁和. 复杂应力路径下人工冻砂土非线性流变本构模型与应用研究[J]. 岩土工程学报, 2008(10): 1496-1501.
- [26] 陈生水, 沈珠江, 郦能惠. 复杂应力路径下无粘性土的弹塑性数值模拟[J]. 岩土工程学报, 1995(2): 20-28.
- [27] 薛龙, 王睿, 张建民. 粒状介质三维复杂应力加载离散元数值试验方法[J]. 岩土力学, 2018, 39(12): 4681-4690.
- [28] 刘嘉英, 马刚, 周伟, 等. 基于离散元的颗粒材料三维临界状态与剪胀特性研究[J]. 水利学报, 2017, 48(9): 1107-1117, 1125.
- [29] 李涛, 蒋明镜, 孙若晗. 多种应力路径下结构性土胶结破损演化规律离散元分析[J]. 岩土工程学报, 2020, 42(6): 1159-1166.