

# Research on the Application of Discrete Element Method in Sand Liquefaction

Wenbiao Ma

College of Civil Engineering, Hebei University of Engineering, Handan, Hebei, 056038, China

## Abstract

Saturated sand is prone to liquefaction under seismic load, which is of great significance to the study of sand liquefaction. Based on the introduction of the basic idea of discrete element particle flow, this paper reviews the research progress of particle flow numerical simulation in sand liquefaction, and discusses its development trend.

## Keywords

discrete element; PFC; sandy soil liquefaction; numerical simulation

# 离散元研究方法在砂土液化中的应用综述

马文彪

河北工程大学土木工程学院, 中国 · 河北 邯郸 056038

## 摘 要

饱和砂土在地震荷载作用下极易发生液化, 对砂土液化的研究具有十分重要的意义, 论文在介绍离散元颗粒流基本思想的基础上, 对颗粒流数值模拟方法在砂土液化领域的研究进展进行了综述, 并对其发展趋势进行了探讨。

## 关键词

离散元; PFC; 砂土液化; 数值模拟

## 1 引言

岩土工程中许多研究对象本质上是由散体介质胶结而成, 通过颗粒介质材料承受并传递上部荷载。由于砂土液化的复杂性, 常规的数值模拟方法, 如有限单元法在分析大变形问题时常常带有局限性。颗粒离散元分析方法可以更好地模拟砂土等散体颗粒的力学性质, 可以揭示复杂条件下的细观机理。为了更好地研究离散元颗粒流方法, 论文在介绍颗粒流思想的基本原理基础上, 对颗粒流在砂土液化研究过程中的应用和研究现状作了叙述与分析, 并对其未来发展趋势进行了探讨。

## 2 颗粒离散元法简介

PFC 程序 (Particle Flow Code) 又称为颗粒流方法, 颗粒离散元法被用来解决不连续介质的数值模拟问题。把散体材料看作颗粒, 用有限个颗粒体去填充特定的空间。每个颗粒被表示为一个实体, 颗粒间的相互接触则借助相互作用定律<sup>[1]</sup>。Cundall 和 Strack<sup>[2]</sup>首次运用离散单元法来研究散体颗粒介质的力学性质。目前, 已经成为研究散体颗粒细观性

质的有力手段。颗粒流分析方法从开始模拟室内试验发展到现在被用来模拟实际工程问题, 已经成为岩土工程中十分有效的方法。

## 3 颗粒流方法在砂土液化研究中的应用

室内单元试验模拟砂土液化多采用循环荷载的加载方式, 用常体积法实现模型的不排水剪切过程, 研究砂土二维数值试样再循环荷载下的液化特性。实际工程的模拟则需要复杂的流固耦合过程, 颗粒流软件 PFC 中可实现流体与颗粒的单向耦合、采用 python 语言内置 CFD 模块实现颗粒与流体双向耦合, 通过与外部其他流体计算软件, 如 openfoam 等进行耦合来实现。国际上学者对此做了很多研究并取得了很多成果, 选取代表性的文章进行论述。

刘洋等<sup>[3-5]</sup>采用颗粒流方法模拟了不同排水条件下松砂与密砂等应变幅值和等应力幅值的循环剪切试验, 采用常体积条件模拟不排水过程。得到了与室内试验结果一致的规律, 研究表明诱发各向异性是循环荷载下砂土的最为重要的力学特性。细观机理为当结构各向异性与应力各向异性不匹配时, 就会造成系统的平均配位数下降, 对应宏观现象下的孔隙水压力上升, 最终造成试样的液化破坏。并在饱和和砂土连续力学模型的基础上, 建立了一个砂土固体颗粒与流体相耦合的细观模型, 用二维渗流问题进行了验证。结果表

【作者简介】马文彪 (1997-), 男, 中国河北秦皇岛人, 硕士, 从事地基与基础工程研究。

明,建立的流固耦合细观模型可以较好地模拟渗流、砂土液化等工程问题。

周建等<sup>[6]</sup>利用 PFC2D 常体积循环双轴试验条件,对砂土双轴试验进行了等应力幅值的加载模拟。数值模拟得到的砂土液化宏观响应与室内试验结果相吻合。研究表明,离散元数值模拟可以较好地再现砂土液化的宏观力学响应,通过接触力法向演化极点图可以较好地观测到试样的初始液化、加荷剪胀、卸荷剪缩的转换现象,为砂土液化后的强度丧失问题提供了有力的细观力学解释。配位数、接触法向、粒间接触力是影响砂土液化宏观特性的重要细观组构参量。数值模拟较好地阐释了砂土再循环荷载下液化破坏的细观机理,对后续的研究提供指导与借鉴。

史旦达<sup>[7]</sup>基于颗粒离散元与计算流体动力学耦合的方法,在 PFC3D 进行二次开发实现对基地不规则地震波的输入,研究了福建中砂在 Kobe 地震波激励下的宏观响应,并与福建中砂离心机室内试验结果进行了对比。数值模拟结果表明试样达到液化的时刻即为输入地震波的加速度峰值对应时刻,浅层土体比深层土体更早发生液化,超静孔隙水压力由深部土层到浅部土层逐渐消散。定义了归一化拖曳力为土颗粒收到的竖向流体拖曳力与颗粒有效自重的比值,当此值到达 1,即认为试样发生了液化。液化后期,深层土体的归一化拖曳力接近于 0,对应于孔隙水压力由深部土层到浅部土层发展的宏观消散规律。

张昭<sup>[8]</sup>开展了圆盘颗粒、不可破碎非圆颗粒及可破碎非圆颗粒的循环双轴数值模拟,并与室内试验结果进行了对比。结果表明,砂土液化后大应变的产生机理在于克服可逆的剪应变,所以椭圆颗粒液化后的剪应变小于圆形颗粒,并建议了一个新的描述孔隙均匀化程度的量化指标—孔隙率标准差,并分析了孔隙率标准差随剪应变的变化规律。在不同条件下,即使孔隙率标准差到达谷底值的发展速率不同,但是到达初始液化时对应的谷底值却基本一致,可以较好地描述同一试样在不同应力状态和应力路径下液化后剪应变的发展过程。孔隙率标准差这一指标揭示了砂土液化的本质机理,对今后的研究有较大的借鉴意义。

张伏光等<sup>[9]</sup>将已有的三维完整胶结接触模型引入到三维离散元程序中,采用等应力幅循环加载的方式,通过体积

恒定来实现不排水条件,开展了不排水循环荷载条件下胶结砂土宏观力学性质离散元的模拟研究。对比试验结果,模拟结果可以较好的反应水泥胶结砂土的动力学性质。研究表明:胶结的存在可以抑制轴向应变和孔压的发展,提高砂土的抗液化强度,当循环应力比较小时,力学配位数增加,仅有少量胶结结构被破坏,与净砂的宏观力学性质有很大不同。对于胶结程度一样的试样来说,在发生初始液化之前,随着循环应力比的增加胶结破坏得更加剧烈,胶结破坏的主要形式以受拉破坏为主,受压破坏其次,接触点偏组构更快趋近于 0。较好地阐述了胶结模型提升砂土抗液化能力的细观机理。

## 4 结语

目前,颗粒流在砂土液化中的应用在模拟室内单元试验方面居多,已被证明可以较好地模拟砂土液化过程中的宏观现象,实现对砂土液化过程中细观机理的分析。由于在 PFC 颗粒流软件中添加水的作用较为复杂,应多探寻与不同流体计算软件的耦合运用来更好地解决实际工程问题。

## 参考文献

- [1] 石崇,张强,王盛年.颗粒流(PFC5.0)数值模拟技术与应用[M].北京:中国建筑工业出版社,2018.
- [2] CUNDALL P A, STRACK O D L. A discrete numerical model for granular assemblies[J]. Geotechnique, 1979,29(1):47-65.
- [3] 刘洋,周健,吴顺川.循环荷载下砂土变形的细观数值模拟 I:松砂试验结果[J].岩土工程学报,2007,29(7):7.
- [4] 刘洋,吴顺川,周健.循环荷载下砂土变形的细观数值模拟 II:密砂试验结果[J].岩土工程学报,2007,29(11):7.
- [5] 刘洋,周健,付建新.饱和砂土流固耦合细观数值模型及其在液化分析中的应用[J].水利学报,2009(2):7.
- [6] 周健,杨永香,刘洋,等.循环荷载下砂土液化特性颗粒流数值模拟[J].岩土力学,2009,30(4):6.
- [7] 史旦达,王飞.饱和砂土自由场地地震液化的离散元模拟[J].上海海事大学学报,2017,38(3):7.
- [8] 张昭.饱和砂土液化模拟及液化细观机理研究[D].成都:西南交通大学,2018.
- [9] 张伏光,聂卓琛,陈孟飞,等.不排水循环荷载条件下胶结砂土宏观力学性质离散元模拟研究[J].岩土工程学报,2021,43(3):9.