

Multiscale Method for
Fluid-Soil-Structure Interaction System

流体-土-地下结构的 双尺度动力分析方法研究

金炜枫 著

流体—土—地下结构的双尺度 动力分析方法研究

金炜枫 著

图书在版编目(CIP)数据

流体-土-地下结构的双尺度动力分析方法研究/金
炜枫著. —杭州: 浙江大学出版社, 2016. 5

ISBN 978-7-308-15931-9

I. ①流… II. ①金… III. ①土木工程—动力学分析—
分析方法—方法研究 IV. ①TU43

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2016) 第 123482 号

流体-土-地下结构的双尺度动力分析方法研究

金炜枫 著

责任编辑 赵黎丽

责任校对 陈慧慧 丁佳雯

封面设计 杭州林智广告有限公司

出版发行 浙江大学出版社

(杭州市天目山路 148 号 邮政编码 310007)

(网址: <http://www.zjupress.com>)

排 版 杭州林智广告有限公司

印 刷 杭州日报报业集团盛元印务有限公司

开 本 710mm×1000mm 1/16

印 张 8.75

字 数 135 千

版 印 次 2016 年 5 月第 1 版 2016 年 5 月第 1 次印刷

书 号 ISBN 978-7-308-15931-9

定 价 45.00 元

版权所有 翻印必究 印装差错 负责调换

浙江大学出版社发行中心联系方式: (0571) 88925591; <http://zjdxcs.tmall.com>

前 言

目前对流体-土-地下结构耦合体系的研究主要基于连续体模型。近年来出现用离散颗粒模拟土体试图从细观层面研究土体的力学行为和用流体-离散颗粒耦合模型模拟液化现象,但受离散颗粒数量和计算机性能的限制,很难在全域上采用离散颗粒模拟土体的力学行为,另外已有的流体-离散颗粒耦合模型采用固定的流体网格,难以考虑流体-土-地下结构耦合体系所伴随的流体边界移动问题。而最近发展起来的固体离散-连续耦合方法还不能与流体耦合。针对这些问题,作者通过改进固体离散-连续双尺度耦合动力算法,建立适宜边界网格移动的流体方程和构建相应的流固耦合框架,提出了流体-土-地下结构的双尺度动力分析方法。

本书的内容是作者关于流体-土-地下结构双尺度动力分析方法的研究成果,整体安排如下:

第1章是绪论,主要讲述现有双尺度土体模拟方法的研究进展以及存在的问题。

第2章介绍固体离散-连续双尺度耦合动力算法的有关研究工作,包括作者构建的耦合优化模型,并基于双尺度方法求解了隧道振动的小应变问题和地震中地下结构坍塌的大变形问题。

第3章介绍流体-离散颗粒耦合动力分析方法的有关研究工作,包括作者构建的流体方程和适用于流固耦合问题的伺服围压算法,并进行了流体-离散颗粒耦合的循环双轴液化数值试验。

第4章介绍流体-土-地下结构的双尺度动力分析方法的有关研究工作,包括作者提出的流体与离散-连续固体的耦合框架,以及将 Finn 宏观液化模型引入流体动量守恒方程的方法,并模拟了地震中地下结构和土体响应的离心机试验。

感谢我的导师周健教授对我研究工作的指导和帮助!

本书的研究工作得到了国家自然科学基金(“强震液化过程中流体与离散颗粒-连续土体及结构耦合的双尺度方法研究”,批准号:51408547)和浙江省自然科学基金(“地震作用下水-土-地下结构耦合体系的双尺度方法研究”,批准号:LQ14E080009)的资助,在此表示感谢!

限于作者水平,书中难免有不足之处,敬请批评指正。

金炜枫

2015年11月5日于浙江科技学院

目 录

第 1 章 绪 论	1
1.1 概 述	1
1.2 固体离散-连续双尺度方法发展现状	2
1.2.1 离散元方法的发展现状及发展双尺度方法的原因	2
1.2.2 固体离散-连续耦合方法发展现状	2
1.3 流体方程	4
1.3.1 实现流体微分方程有限元离散后稳定的方法	4
1.3.2 适用于流体边界网格移动的 ALE 描述	5
1.4 流体-离散颗粒耦合模拟方法发展现状	6
1.5 宏观和细观尺度上液化的模拟方法发展现状	7
1.5.1 宏观尺度上液化的连续体模拟现状	7
1.5.2 细观尺度上液化的离散颗粒模拟现状	9
1.6 本书的主要内容	10
第 2 章 固体离散-连续双尺度耦合动力分析方法	12
2.1 概 述	12
2.2 土体离散-连续双尺度动力耦合算法	13
2.3 离散颗粒的自振柱模拟方法	16
2.4 数值算例	19
2.4.1 小应变振动: 列车振动下隧道与土体响应的双尺度耦合模拟	19
2.4.2 大变形破坏: 地铁车站在地震中坍塌过程的双尺度耦合模拟	26

2.5 小 结	30
第 3 章 流体-离散颗粒耦合动力分析方法	31
3.1 概 述	31
3.2 适用于边界网格移动的流体方程	32
3.2.1 建立流固耦合中基于 ALE 描述的流体微分方程	32
3.2.2 基于特征线分离(CBS)方法对所建立的方程分离分步	37
3.2.3 有限元离散	40
3.3 适用于流固耦合的围压伺服算法	44
3.3.1 建立围压伺服控制的弹簧-振子模型	45
3.3.2 建立伺服控制的 HJB 方程并推导其解析解	47
3.3.3 伺服算例	49
3.4 算例: 基于流体-离散颗粒耦合的饱和砂土液化的循环双轴模拟	65
3.4.1 计算参数及数值模型	68
3.4.2 模拟结果及分析	69
3.5 小 结	84
第 4 章 流体-土-地下结构的双尺度动力分析方法	86
4.1 概 述	86
4.2 建立流体与离散-连续固体耦合框架	87
4.3 建立流体-土-地下结构的离散-连续耦合动力分析方法	90
4.3.1 流体-土-地下结构的离散-连续耦合框架	90
4.3.2 流体网格移动控制策略	92
4.4 算例: 模拟地震作用下结构与土体响应的离心机试验	95
4.4.1 计算参数及数值模型	95
4.4.2 模拟结果及分析	100
4.5 小 结	112
参考文献	113
索 引	132

第1章 绪 论

1.1 概 述

目前,对流体-土-地下结构耦合体系的研究主要基于连续体模型。近年来,出现了用离散颗粒模拟土体试图从细观层面研究土体的力学行为,并且发展了流体-离散颗粒耦合模型;但是这个模型采用空间固定的流体网格,难以考虑流体-土-地下结构耦合体系所伴随的流体边界移动问题。另外,受离散颗粒数量和计算机性能的限制,很难在全域上采用离散颗粒模拟土体的力学行为。为此,人们发展了固体离散-连续耦合方法,但目前这一方法没有与流体耦合。针对这些问题,本书通过改进固体离散-连续双尺度耦合动力算法、建立适宜边界网格移动的流体方程和构建相应的流固耦合框架,提出流体-土-地下结构的离散-连续耦合动力分析方法,以从细观层面对流体-土-地下结构动力耦合体系进行精细化研究。

本书研究的意义在于为流体-土-地下结构动力耦合效应的研究提供一种新的方法,即不仅考虑流体-土-地下结构耦合体系中的流体移动边界问题,而且可以从细观尺度上模拟关心区域土体的细观特性以及结构与土的非连续接触作用,同时能有效减小离散元模拟规模。

1.2 固体离散-连续双尺度方法发展现状

1.2.1 离散元方法的发展现状及发展双尺度方法的原因

在离散颗粒的细观尺度上建模,可以在细观机理上模拟颗粒材料的力学行为。对于建立离散颗粒接触碰撞模型,尽管目前的计算模拟理论可以做到非常精细有效,例如基于有限元方法,两个碰撞的颗粒可以划分足够精细的网格,其边界上可以设置接触单元,材料可以是弹性、超弹性或塑性等,但是在离散颗粒模拟中,首要的问题是要有足够多的颗粒来组成数值试样,在颗粒上细分网格加大了计算量,限制了颗粒模拟规模。所以简化的颗粒接触碰撞模型虽然出现较早,但可以模拟较多数量的颗粒,是现在模拟离散颗粒材料的主流方法。

Cundall 和 Strack^[1] 给出颗粒集合体的离散元模型(discrete element method, DEM),该模型中颗粒用二维圆盘模拟,应用牛顿第二定律控制单个颗粒的运动,以两个圆盘的相互重叠量计算颗粒间的相互作用力。这是一种简化的碰撞接触问题,其优势在于能获得较多数量的颗粒以组成数值试样。为获得非圆颗粒,有用圆颗粒联结组成非圆颗粒^[2-4]、椭圆颗粒^[5-11]、多边形颗粒^[12,13]。离散元的运动方程虽然简单,但接触模型的变化也会导致计算时步的不同,较小的时步也增加了模拟时间。另外,颗粒的接触位置判断需要耗费大量的时间。接触模型及其研究进展参见文献[14—17],颗粒接触搜索方法参见文献[18—20]。

目前,基于离散元模拟离散颗粒材料,由于计算机能力的限制,颗粒的模拟数量往往难以满足要求,这促使人们寻找减少离散元模拟规模的有效途径,例如,通过双尺度方法来减少离散元模拟规模。

1.2.2 固体离散-连续耦合方法发展现状

固体离散-连续耦合是一个双尺度问题,其目的在于衔接离散颗粒的细观尺度和连续固体的宏观尺度。在离散颗粒细观尺度上直接模拟固体的力学行为,有助于在离散颗粒尺度上理解其机理;但是受计算机硬件限制,离散颗

粒的计算规模受到极大限制。发展固体离散-连续耦合多尺度方法的动力,很大程度上源自减少细观尺度上计算量的需求。

目前,主要有三类多尺度耦合问题,分述如下。

第一类是基于小参数摄动展开的均匀化方法(homogenization method)。在跨尺度衔接理论中,该方法是最为严格的。其唯一的假设是周期性假设,即宏观固体是由细观单胞周期性堆积而成。在固体微结构是固定的问题上,基于摄动展开的均匀化方法获得了极大的成功。在其推导得到的结论中,既可以从具体微结构的细观尺度上建立材料宏细观属性的联系,也可以得到应力等变量在细观尺度的局部涨落。对于离散颗粒材料,人们试图应用这一类方法建立细观与宏观的联系^[21-27]。但是对于离散颗粒材料,目前均匀化方法仍没有建立至具体离散颗粒尺度,其难点在于颗粒有相互滚动的状态,这也是将离散元引入均匀化方法的障碍。

第二类方法是在全域上用连续模型,同时,在连续模型各单元上用离散元模拟得到宏观模型所需参数。但目前这类方法只能实现数据的单向传输,即只能单向地将离散元的计算结果输出至连续模型中,从而实现跨尺度衔接^[28-30]。

第三类方法是在关心区域用离散颗粒模拟,远离关心区域用连续体模拟,在离散-连续耦合边界上须保证连续性。这时,连续体更像是一种边界条件。对于离散颗粒材料,能实现离散-连续耦合边界上连续性的方法较少,主要原因在于离散颗粒模拟中须考虑颗粒的相互滚动摩擦,这给耦合边界上的跨尺度衔接设置了障碍。目前,一类行之有效的方法是:在每一时步的动力分析中,保证耦合边界上力和速度的连续性^[31-33]。其基本思想为:①连续模型在耦合边界上的速度作为离散颗粒的速度;②离散颗粒对耦合边界的接触力作为连续模型的力边界。其本质是:在耦合边界上交换离散和连续模型的力和速度,从而保证连续性。

对于上述的三类方法,其中基于摄动展开的均匀化方法计算量少,适用于弹性或局部损伤问题,但不适用于断裂或大变形情况;全域上用连续模型,连续模型各单元所需计算参数由离散元模拟得到,目前,这类模型只能实现由离散模型向连续模型传输数据,还无法实现离散-连续的双向耦合;关心区域用离散颗粒模拟,其他区域用连续体模拟,宏细观耦合边界上保证连续性,在离散颗粒区域可以考察关心区域的细观特性,同时,有效减小离散元模拟规模,以节省计算时间。

1.3 流体方程

1.3.1 实现流体微分方程有限元离散后稳定的方法

流体质量守恒方程和动量守恒方程的离散,包括空间离散和时间离散。早期的空间离散采用有限差分方法,其后出现了有限元方法及无网格方法。流体微分方程离散后的对流项矩阵是非对称的,这种非对称性造成标准 Galerkin 离散流体方程形成的有限元形式并不是方程的最近似解,并且此时得到的数值解在空间上可能有虚假振荡^[34],Zienkiewicz 等^[35]也将这种对流项矩阵的非对称性称为非自伴随性(non-self-adjoint)。

由于流体方程中矩阵的非对称性(非自伴随性),在有限元方法中,用标准 Galerkin 方法离散流体质量守恒和动量守恒方程时,须选择合适的流速形函数和压强形函数的组合,以使有限元离散后满足稳定性条件;这时得到的数值解在空间上不会有虚假振荡。从数学框架上明确流速和压强形函数的可行组合,参见文献[36,37];在有限元的数学理论中,这组成了著名的 Babuska-Brezzi 限制条件^[38]。Zienkiewicz 等^[39]给出了分片试验,通过了分片试验的流速和压强形函数的组合,可以应用于流体微分方程的标准 Galerkin 有限元离散;Zienkiewicz 和 Taylor^[40]再次对分片试验的收敛性、有效性和误差估计进行了测试。一般情况下,基于等低阶流速和压强形函数的组合,用标准 Galerkin 方法离散流体微分方程,是无法回避此限制条件的,其结果是导致压强的虚假数值振荡。非等阶的流速和压强形函数组合,增加了离散流体微分方程和实现流体网格移动的困难。

对于瞬态流动问题,目前应用较广的主要有两类行之有效的方法,可以让等低阶的流速和压强形函数直接应用于标准 Galerkin 方法离散流体微分方程的过程中。

其中一类的基本思想是:在 Galerkin 离散过程中,对于加权余量法的权函数增加扰动项,有时扰动项取摄动项。这类方法以广泛应用的流线迎风 Petrov-Galerkin(streamline upwind/Petrov-Galerkin,SUPG)方法为代表,也包括 Galerkin 最小二乘法(Galerkin least squares, GLS)等。Brooks 和

Hughes^[34]针对对流项占主导的不可压缩 Navier-Stokes 方程,提出了 SUPG 方法。这种方法具有传统迎风(upwind)方法的优点,却没有人工扰动标准的限制,其标准 Galerkin 权函数增加了流线迎风的摄动项。Hughes 等^[38]针对等阶流速和压强形函数的 Stokes 流,给出了避免 Babuska-Brezzi 限制条件的 Petrov-Galerkin 方法。Hughes 等^[41]针对线性对称多维对流扩散系统给出 SUPG 形式的有限元法。Hughes 等^[42]还针对压强和流速的任意形函数组合,给出了对称的有限元形成方法。Hughes 等^[43]针对对流扩散问题给出了 Galerkin 最小二乘法,这是一种从概念上简化的 SUPG 方法。Hughes^[44]针对可压缩的 Navier-Stokes 方程中 SUPG 方法的进展及应用进行了评述。在多尺度问题中,流速和压强形函数应用于 Galerkin 方法离散流体方程的稳定性问题参见文献[45—47]。流体问题中,这种在权函数中增加摄动扰动项的方法不仅在传统有限元中得到广泛应用,还在浸入式有限元方法(immersed finite element method, IFEM)^[48]、扩展有限元方法(extended finite element method, X-FEM)^[49]、无网格再生核粒子方法(reproducing kernel particle method, RKPM)^[48,50,51]中,得到了广泛应用。

另一类是基于特征线的分离(characteristic-based split, CBS)^[52,53]算法,该算法融合了分离(split)算法和特征线 Galerkin 方法(characteristic Galerkin method)。不同于上文提及的第一类方法, CBS 算法不在加权余量法的权函数中增加摄动项,而是直接对流体的控制微分方程进行分离,分离后的微分方程可以直接用标准 Galerkin 离散。CBS 算法中,流体方程的分离过程中保留了一个时间步长的二次方项,以保证压强在空间不产生虚假振荡^[35]。CBS 算法已包括在时域上的离散,分离流体方程得到的微分方程可以用有限元或无网格法等空间离散。经 CBS 算法分离后,由于流速和压强向量分开计算,矩阵的阶数要小于直接用 SUPG 方法形成的有限元矩阵阶数,因此,其计算规模相对要小。CBS 算法的应用与进展参见 CBS 算法应用于流体中的热传导^[54]、CBS 算法的稳定性^[55]、CBS 算法的边界条件^[56]、时间步长作为稳定化参数^[57],以及人工压缩项作为 CBS 算法中稳定化参数^[58]。

1.3.2 适用于流体边界网格移动的 ALE 描述

不考虑流体边界移动时,流体微分方程一般采用的是 Eulerian 描述。在

Eulerian 描述中,空间坐标是固定的,即不随流体质点移动,在有限元离散后表现为空间网格固定。若空间坐标随流体质点移动,则称为 Lagrangian 描述;这时用有限元离散流体微分方程后,计算过程中需重新划分网格,以避免网格过分扭曲。对于流体移动边界问题,最直接的方法是采用流体微分方程的 Lagrangian 描述,但计算过程中的网格重划分给应用带来了困难。

有两种方法可以实现人为控制流体网格移动,而不像基于 Lagrangian 描述时那样需要网格重划分。一种为变形空间域/时空(deforming-spatial-domain/space-time,DSD/ST)过程^[59,60],但其应用较少;另一种为基于任意 Lagrangian-Eulerian(arbitrary Lagrangian-Eulerian,ALE)描述的方法,其应用较第一种广泛。

ALE 方法是直接在流体微分方程中引入参考坐标系,这时对微分方程中的参考坐标系项离散,可得节点速度向量,这些参考坐标系节点速度可用于指定网格移动速度。这种参考坐标系综合了 Eulerian 和 Lagrangian 描述的特点,称为 ALE 描述。参考坐标系在空间固定时,ALE 描述退化为 Eulerian 描述;参考坐标系随质点运动时,ALE 描述退化为 Lagrangian 描述^[61]。

对于引入 ALE 方法的流体微分方程,最早是用有限差分方法离散的,其后,有限元被应用于方程的离散。在有限差分的框架下,早在 1973 年,Amsden 和 Hirt^[62]在其报告中就给出了引入 ALE 方法的流体微分方程的有限差分程序;Pracht^[63]给出了 ALE 描述下流体网格移动的三维模拟;Stein 等^[64]给出了 ALE 描述下流体和结构相互作用的模拟。在有限元领域,Belytschko 和 Kennedy^[65]引入 ALE 描述。Belytschko 等^[66]基于流体的 ALE 描述,给出了流体和结构相互作用的可控制网格移动的有限元方法。ALE 描述下的流体方程适宜流体界面追踪,典型的界面追踪如自由表面波模拟^[67-75]。Hughes 等^[76]给出了基于 ALE 描述的流体与结构相互作用及自由表面波模拟。Liu 和 Gvildys^[77]基于 ALE 描述给出了移动桶中液体晃动的模拟。

1.4 流体-离散颗粒耦合模拟方法发展现状

本节讨论的流体方程包含流体质量守恒方程和动量守恒方程,固相为离散颗粒。根据流体是基于等同于颗粒的细观尺度描述还是宏观尺度描述,连

续流体-离散颗粒耦合有两种类型。

第一种类型,用细观尺度描述流体时,一般精细化地模拟了流体与固体颗粒的相互作用。基于 Lagrangian 描述对流体网格重划分,如 Johnson 和 Tezduyar^[78]用网格重划分(remesh)三维模拟了 100 个颗粒和流体的相互作用,以及基于 ALE 描述控制流体与颗粒边界网格移动,直接模拟流体和固体的相互作用^[79],可以使用固定流体网格而无须流体网格重划分的分布式 Lagrange 乘子法(the distributed Lagrange multiplier method,DLM),但颗粒为刚体^[80,81]。基于 Lagrangian 描述并用光滑质点流体动力学(smoothed particle hydrodynamics,SPH)方法离散时,流体与离散颗粒耦合,每个固相颗粒包含上百个流体 SPH 粒子^[82]。Zhang^[48]给出了无须流体网格重划分的浸入式有限元方法(immersed finite element method,IFEM),模拟 20 个软球在流体中的运动。

第二种类型,离散颗粒仍在细观尺度上模拟,而流体在宏观尺度上模拟,局部区域上取离散颗粒的平均属性求取流固耦合作用力,如离散颗粒-连续流体耦合中的液化模拟^[83-85]。

在上述第一种类型中,流体取与颗粒一样的尺度时,可以实现流固耦合的精细化模拟,但流体计算规模限制了离散颗粒的模拟规模;而在上述第二种类型中,流体取宏观尺度,颗粒在细观尺度上模拟,取局部区域颗粒的平均属性以实现流固耦合的跨尺度衔接,这时可较大提高离散颗粒的计算规模。

1.5 宏观和细观尺度上液化的模拟方法发展现状

1.5.1 宏观尺度上液化的连续体模拟现状

饱和砂土在振动载荷下发生液化时,其有效应力降低,而孔压上升。为模拟这一现象,以模型中描述液化孔压上升机制为标志,液化模型的发展经历了两个阶段。第一个阶段是用经验公式给出孔压上升模式,控制微分方程为 Biot 方程形式,包含固体动量守恒方程和流体质量守恒方程,或者只有固体动量守恒方程;由经验公式得到的孔压增量施加至流体质量守恒方程,以在流固耦合模拟时模拟孔压上升,或者单向地由固体动量守恒方程计算

得到模拟孔压增加所需数据。液化模型发展第二个阶段的核心是假设固相不可恢复的体应变是造成液化过程中孔压上升的原因,在这个假设下人们发展了一系列的塑性模型。在流体质量守恒方程中固相不可恢复的塑性体应变造成液化过程中孔压上升,这时使用的控制微分方程绝大多数为传统的 Biot 方程,即只包含固体动量守恒方程和流体质量守恒方程;虽然广义 Biot 方程包含了流体动量守恒方程,但连续体液化模拟中包含流体动量守恒方程的模型很少。

液化模型发展的第一个阶段中,核心在于孔压增加的经验公式。应用较为广泛的形式是液化过程中孔压增量随有效应力和振次变化,其基本形式的经验公式由 Seed 等^[86]根据不排水液化试验结果给出。徐志英和沈珠江^[87]改进了这一经验公式,对尾矿坝进行液化分析,在其模拟中只使用固体动量守恒方程,单向地从固体计算结果输出数据求解孔隙水压力增量,因此,这不是真实意义上的流固耦合;类似的有坝体液化模拟^[88,89]。流固耦合时,采用固体动量守恒和流体质量守恒,基于有效应力和振次的经验公式获得孔隙水压力增量,将其代入流体质量守恒方程以模拟液化过程中孔压上升,如土坝地震孔隙水压力的三维动力分析^[90]和海床液化模拟^[91]。也可以用竖向应力变化率代入流体质量守恒方程,以模拟液化过程中孔压上升^[92]。也有以能量原理推导孔压增长模式的模拟^[93]。以上是模拟孔压上升的过程,对于模拟液化后孔压逐渐消散的过程,还需不同的模型;如 Kim 等^[94]给出孔压消散模型,这个模型是基于液化后土层密实厚度随时间变化的公式得出的,并模拟了离心机试验中砂土液化后孔压消散过程。

为从液化细观机制上建立液化模型,人们给出液化时孔压增加是由于固相出现不可恢复体应变的假设,但建立模型时,不可恢复体应变仍由经验公式获得,如 Finn 模型^[95]。Finn 模型建立半个循环周期内不可恢复体应变与孔压增量的关系,虽然在液化机理上认为液化过程中孔压上升是由于固体颗粒的重排列引起孔隙体积减小而造成的,但 Finn 模型并不是从固相本构上求得不可恢复体应变,而是给出不可恢复体应变与半个周期内剪应变关系的经验公式。Byrne^[96]给出了 Finn 模型的简化形式。国内有基于 Finn 本构模型进行饱和砂土液化分析的研究成果^[97]。

液化模型发展的第二个阶段中,出现了一系列塑性模型,可以从固相本

构上实现不可恢复体应变的模拟;不可恢复体应变与流体质量守恒方程耦合,即构成液化过程中孔压上升机制。这些特殊的塑性模型主要有:①边界面模型(bounding surface model),由 Dafalias^[98]建立,其发展和在液化问题中的应用见文献[99—104];②多屈服面模型(multi-yield surfaces model),其发展和应用见文献[105—109];③广义塑性模型(generalized plasticity model),其扩展和改进见文献[110—113];④循环弹塑性模型(cyclic elasto-plastic model),由 Oka 等^[114]给出,该模型考虑了塑性剪切模量依赖于应变的累积特性,而 Yuan 和 Sato^[115]在液化模型中,考虑了流体的动量守恒方程,固相用 Oka 等^[114]建立的循环弹塑性模型;⑤Anandarajah^[116]基于微观上的滑移-滚动理论(sliding-rolling theory)给出砂土液化的塑性模型,该模型对于不排水颗粒材料显示出大量的累积体应变增量,并基于 Nevada 砂的三轴试验得到验证。

国内对于液化中固相的塑性模型也做了很多相关工作,如考虑颗粒滑移和滚动对塑性变形的作用建立了液化的塑性模型^[117];阐明三个体积应变分量的组合变化规律控制砂土液化的产生和发展^[118];由边界面塑性本构框架,联系三个体积应变分量,建立可描述砂土液化后大变形的弹塑性本构模型^[119];基于饱和砂循环本构模型模拟离心机砂土液化试验^[120];基于多面塑性模型模拟可液化地基中地铁车站场地的地震响应^[121];基于广义塑性模型及其改进模拟液化土层和地下结构在地震中的响应^[122—124];采用有效循环弹塑性模型,基于 Biot 固结理论作为饱和砂土的控制方程,用无网格法离散方程,模拟坝体液化^[125,126]。

液化模型中的孔压增长,可以用经验公式直接给出,这时模拟计算量较小,并且稳定性问题也较少;也可以用不可恢复体应变与流体质量守恒方程耦合得到,对于不可恢复体应变,目前的进展集中在特定的固相塑性模型上,这样从机理上模拟了液化,但往往计算效率较低。

1.5.2 细观尺度上液化的离散颗粒模拟现状

在离散颗粒尺度上模拟液化,有两种方法。第一种方法是基于试样体积不变的假设来等效流体的作用,可以良好再现循环载荷下有效应力降低的过程;但实际计算中并没有计入流体,而孔压是由初始围压减去当前有效应力

求得的,如用离散颗粒模拟循环双轴(动三轴的二维离散颗粒模拟)^[127-131]和动三轴模拟^[127]。第二种方法是计入流体质量和动量守恒方程,将流体与离散颗粒耦合。由于已有文献中的流体方程都是基于空间网格固定的 Eulerian 描述,因此,只可以对特定的情况进行模拟,即颗粒采用周期边界;而流体网格固定,已有的模拟如类似自由场中的液化模拟^[83-85,132]。

没有考虑流体边界网格移动机制,是目前在离散颗粒-流体耦合模型中模拟液化的最大限制。由于采用 Eulerian 描述时流体边界无法移动,因此对有边界移动的液化模拟,例如循环双轴和动三轴模拟,只可以用试样体积不变来等效流体作用,但对于振动台的液化模拟,却无法实现体积不变也无法考虑边界移动;而已有文献计入流体质量和动量守恒方程时,也只是针对具有周期边界的颗粒集合体试样进行模拟。

1.6 本书的主要内容

本书的主要内容来自作者的研究工作。本书的研究围绕建立流体-土-地下结构双尺度动力分析方法进行。实现这个方法的基础在于土体离散-连续双尺度耦合模型和适宜流边界网格移动的流体方程以及相应的流固耦合框架。

本书的主要研究内容如下:

第2章讲述固体离散-连续双尺度耦合动力分析方法:提出通过强化边界耦合力在离散和连续模型中的相容性,将提取边界耦合节点力转化为寻优问题的新方法,并用 Lagrange 乘子法求解。此外,还将此方法嵌入离散-连续双尺度耦合动力分析方法。通过算例,将改进的算法用来模拟隧道振动的小应变问题和地震中地下结构坍塌的大变形问题。

第3章讲述流体-离散颗粒耦合动力分析方法,在理论上:①建立包含 ALE 项和流固耦合项的流体质量和动量守恒方程,其中 ALE 项适宜流体边界网格移动控制,然后用 CBS 算法对所建立的微分方程进行分离分步,使其适用于标准 Galerkin 离散以获得有限元格式;②建立一种适用于流体-离散颗粒耦合的伺服围压算法,即建立土体和伺服墙的弹簧-振子模型,然后应用动态规划得到这个最优控制问题的 HJB 方程,推导伺服力的闭环反馈控制函