

岩土工程仿真分析

(理论篇)

孙铁成 岳祖润◎编著

非外借



科学出版社

岩土工程仿真分析

(理论篇)

孙铁成 岳祖润 编著

科学出版社

北京

内 容 简 介

本书在介绍连续介质力学基本概念的基础上,对目前岩土的本构模型进行了分析和阐述,并详细讲解了有限差分法和快速拉格朗日分析算法、有限单元法、边界元法、离散单元法、非连续变形分析法、无网格法,同时对数值流形法进行了简单介绍。

本书可作为土木工程方向岩土工程和地下工程专业的研究生教材,从事岩土工程仿真分析的科研工作者及相关工程技术人员等也可阅读参考。

图书在版编目(CIP)数据

岩土工程仿真分析. 理论篇/孙铁成, 岳祖润编著. —北京: 科学出版社, 2019.9

ISBN 978-7-03-062069-9

I. ①岩… II. ①孙… ②岳… III. ①岩土工程-数值分析-研究
IV. ①TU4

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2019) 第 168220 号

责任编辑: 纪 兴 韩 东 宫晓梅 / 责任校对: 陶丽荣
责任印制: 吕春珉 / 封面设计: 东方人华平面设计部

科学出版社出版

北京东黄城根北街 16 号
邮政编码: 100717
<http://www.sciencep.com>

三河市骏杰印刷有限公司印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2019 年 9 月第 一 版 开本: 787×1092 1/16

2019 年 9 月第一次印刷 印张: 17 3/4

字数: 418 000

定价: 59.00 元

(如有印装质量问题, 我社负责调换〈骏杰〉)

销售部电话 010-62136230 编辑部电话 010-62135763-2015

版权所有, 侵权必究

举报电话: 010-64030229; 010-64034315; 13501151303

前 言

因为岩土工程问题的多样性，解决该方法也具有多样性和复杂性。数学和力学理论的发展，以及计算技术和计算机软硬件的快速进步，为复杂岩土工程问题的解决提供了有效的数值分析方法和手段。

岩土工程仿真分析不仅要具备土力学和数值分析方面的专业知识，了解现有本构模型的局限性，还要熟知各种仿真软件的性能和使用方法。全面掌握这些知识实属不易，本科或研究生阶段的专业学习也很少完全覆盖这些知识，这样就需要读者不断拓展自身的知识面。另外，很多刚接触岩土工程仿真分析的研究人员往往在得到计算结果后，因不了解计算结果的局限性和缺陷，导致对岩土工程问题的误判。由于岩土工程问题的复杂性，不应期望用一种仿真分析方法解决所有问题。本书基本涵盖了解决岩土工程问题的主要仿真分析方法，读者可以通过本书的学习，有针对性地选择解决不同岩土工程问题的仿真分析方法。

显然，本书不可能涉及与岩土工程有关的所有仿真分析方法和知识。其一，涉及的领域庞大，全面覆盖这些内容需要很长的篇幅；其二，目前岩土工程相关理论和仿真分析方法均在进步，并且还有很多新的仿真分析方法不断涌现；其三，我们的研究经验有限。因而，本书主要侧重于当前较为成熟并且对读者有帮助的内容进行详细阐述，而对于需要进一步完善的仿真分析方法只做简单的介绍。如果读者对这些仿真分析方法感兴趣，可查阅相应的专著进一步了解。

本书由孙铁成教授和岳祖润教授编著，在撰写过程中，还得到了河北省研究生示范课程建设项目的资助。

作者特别感谢赵志伟、郭旺、杨志浩等研究生为本书的文字、图表所做的大量绘制等工作。

希望本书的出版发行，能为岩土工程问题的仿真分析尽绵薄之力。

在本书的编写过程中，作者参阅了许多同领域的科研成果与文献资料，并尽可能将其列于书后的参考文献中，在此对这些文献的作者表示衷心的感谢。由于作者理论水平和工作经验有限，书中难免有不足之处，诚望广大读者批评指正。

作 者

2018年12月

目 录

第 1 章 绪论	1
1.1 岩土工程问题的特点	1
1.2 岩土工程仿真分析方法概述	3
1.3 岩土工程仿真分析发展的必然性	5
1.4 岩土工程仿真分析方法的发展	6
1.5 岩土工程仿真分析方法的学习及应用	6
参考文献	7
第 2 章 连续介质力学的基本概念	8
2.1 应力分析	8
2.1.1 一点的应力状态和应力张量	8
2.1.2 柯西公式和求和协定	9
2.1.3 主应力	10
2.1.4 偏应力	11
2.1.5 八面体应力、纯剪应力、主剪应力	11
2.1.6 应力空间及应力路径	14
2.1.7 应力莫尔圆和应力洛德参数	16
2.2 应变分析	18
2.2.1 一点的应变状态	18
2.2.2 应变柯西公式	19
2.2.3 主应变	20
2.2.4 偏应变	21
2.2.5 八面体应变、纯应变、主剪应变	22
2.2.6 应变空间、应变路径	23
2.2.7 应变率张量及应变增量张量	24
2.2.8 应变莫尔圆	25
2.2.9 有限应变	25
2.3 基本方程	27
2.3.1 连续方程	27
2.3.2 运动微分方程	28
2.3.3 协调方程	29
2.3.4 能量方程	30
2.3.5 本构方程	31
2.3.6 边界条件和初始条件	32
参考文献	32

第 3 章 岩土的本构模型	33
3.1 岩石的变形特性	33
3.1.1 岩石的应力-应变关系	33
3.1.2 土的应力-应变关系	34
3.1.3 岩土变形特性	36
3.1.4 岩土变形的影响因素	37
3.2 屈服准则及破坏准则	39
3.2.1 基本概念	39
3.2.2 特雷斯卡屈服准则	43
3.2.3 米泽斯屈服准则	44
3.2.4 莫尔-库仑屈服准则	46
3.2.5 辛克维奇-潘德屈服准则	48
3.2.6 双剪应力屈服准则及广义双剪应力屈服准则	50
3.2.7 格里菲斯屈服准则	53
3.2.8 本构理论的基本准则	54
3.3 土的本构模型分析	58
3.3.1 弹性本构模型	59
3.3.2 塑性本构模型	70
3.3.3 黏弹塑性本构模型	78
3.4 岩土损伤本构理论	79
3.4.1 损伤力学的概念	79
3.4.2 土的损伤本构理论	81
参考文献	87
第 4 章 有限差分法和快速拉格朗日分析算法	88
4.1 有限差分法的基本概念及有限差分格式的建立	88
4.1.1 有限差分法的基本概念	88
4.1.2 差分格式的建立	91
4.2 FLAC 与 FLAC3D 的基本原理	95
4.2.1 FLAC 及 FLAC3D 的基本特征及网格划分	96
4.2.2 一维问题 FLAC 计算流程	97
4.2.3 平面问题 FLAC 有限差分法	100
4.3 FLAC3D 数学模型	105
4.3.1 空间导数的有限差分近似	106
4.3.2 节点运动方程	107
4.3.3 增量形式的本构方程	109
4.3.4 时间导数的有限差分近似	109
4.3.5 阻尼力	109
参考文献	110

第 5 章 有限单元法	111
5.1 引言	111
5.1.1 有限单元法概述	111
5.1.2 有限单元法的发展历程	112
5.2 有限单元法的理论基础	112
5.2.1 有限单元原理与变分原理的关系	112
5.2.2 弹性力学基本方程	113
5.2.3 虚功原理	117
5.2.4 位移模式与形函数	120
5.2.5 刚度与刚度矩阵	121
5.3 有限单元法的基本过程	122
5.3.1 连续体离散化	123
5.3.2 确定位移模式	123
5.3.3 单元分析	125
5.3.4 整体分析	128
5.3.5 求解答	129
5.4 有限单元法求解时应注意的几个问题	129
5.4.1 单元荷载列阵的形成	129
5.4.2 总刚度矩阵的存储	132
5.4.3 整体方程的求解	134
5.4.4 计算结果的整理	137
参考文献	138
第 6 章 边界元法	139
6.1 引言	139
6.1.1 边界元法概述	139
6.1.2 边界元法的发展	140
6.1.3 边界元法的数学基础	141
6.2 间接边界元法	142
6.2.1 边界单元	142
6.2.2 边界积分方程的离散化	143
6.2.3 影响系数矩阵计算	146
6.3 直接边界元法	152
6.3.1 方法实质	152
6.3.2 常量单元	155
6.3.3 线性单元	157
6.3.4 对称条件的利用	165
6.3.5 体积力影响	167
6.4 三维线弹性问题	171
6.4.1 基本解	171

6.4.2	边界单元	171
6.4.3	影响系数的计算	174
6.4.4	组集总体影响系数矩阵	176
	参考文献	178
第7章	离散单元法	180
7.1	引言	180
7.1.1	离散单元法概述	180
7.1.2	离散单元法的发展趋势	181
7.2	散体物料的基本概念	183
7.3	颗粒接触理论	185
7.3.1	模型假设	185
7.3.2	颗粒单元的属性	185
7.3.3	接触模型	186
7.4	软球模型和硬球模型	190
7.4.1	软球模型	190
7.4.2	硬球模型	193
7.4.3	软球模型和硬球模型对比	194
7.5	热传递理论	195
7.6	离散单元的求解过程	196
7.6.1	颗粒接触的检索	197
7.6.2	基于硬球模型的离散单元法	197
7.6.3	基于软球模型的离散单元法	198
7.6.4	时步的确定	200
	参考文献	201
第8章	非连续变形分析法	202
8.1	引言	202
8.2	非连续变形分析法的块体位移和变形	204
8.2.1	分步大变形	205
8.2.2	块体变形子矩阵	205
8.2.3	联立方程式	206
8.2.4	单一块体应力、应变及荷载分析	208
8.2.5	弹性子矩阵	208
8.2.6	应力子矩阵	209
8.2.7	点荷载子矩阵	209
8.2.8	体积力荷载子矩阵	210
8.2.9	惯性力子矩阵	211
8.3	非连续变形分析法的块体接触理论	212
8.3.1	两块体间距离	213
8.3.2	接触和相互嵌入	213

8.3.3	嵌入准则	215
8.3.4	法向弹簧子矩阵	215
8.3.5	切向弹簧子矩阵	218
8.3.6	摩擦力子矩阵	219
8.3.7	块体接触状态与弹簧设置	220
	参考文献	221
第 9 章	无网格法	222
9.1	引言	222
9.2	无网格法研究进展	223
9.2.1	配点型	223
9.2.2	积分型	224
9.3	无网格法分类	227
9.4	无网格法的插值技术	229
9.4.1	几个关键概念	229
9.4.2	移动最小二乘法	232
9.4.3	核积分近似	238
9.4.4	单位分解法	243
9.4.5	径向基函数近似	243
9.4.6	移动最小二乘法与重构核粒子法的比较	244
9.5	无网格法的实现及计算步骤	245
9.5.1	全域伽辽金弱积分形式的实现	245
9.5.2	单位分解积分	250
9.5.3	节点积分	251
9.5.4	局部彼得罗夫-伽辽金积分形式	254
9.5.5	配点形式的实现	255
9.5.6	无网格法的主要计算步骤	261
	参考文献	261
第 10 章	数值流形法	264
10.1	引言	264
10.2	流形法的矩阵覆盖系统	265
10.3	覆盖权函数	267
10.4	覆盖位移函数	267
10.5	流形单元的数值积分	269
10.6	流形单元的应力-应变矩阵	270
10.7	流形法控制方程的形成	271
10.8	小结	272
	参考文献	272

第 1 章 绪 论

1.1 岩土工程问题的特点

土木工程 (civil engineering) 是建造各类工程设施的科学技术的统称, 既指所应用的材料、设备和所进行的勘测、设计、施工、保养、维修等技术活动, 也指工程建设的对象, 即建造在地上或地下、陆上或水中, 直接或间接为人类生活、生产、军事、科研服务等各种工程设施, 如房屋、道路、铁路、管道、隧道、桥梁、运河、堤坝、港口、电站、飞机场、海洋平台、给水排水及防护工程等。土木工程中涉及岩石、土、地下、水中的部分称为岩土工程 (geotechnical engineering), 它是欧美国家于 20 世纪 60 年代在土木工程实践中建立起来的一种新的技术体制, 以便于求解岩体与土体工程问题, 包括地基与基础、边坡和地下工程等研究对象。

岩土体是一种天然形成的地质体, 是自然产物。在漫长的历史进程中, 人类的生产生活所经历的工程建筑史包含对岩土体开发利用的过程。人们以岩土体作为建筑物地基, 也以其作为建筑材料; 另外, 岩土体还是人工结构的环境。岩土工程问题是多种多样的, 其解决方法也具有多样性和复杂性。

1. 工程类型的多样性

城乡建设的快速发展, 促进了人们对土木工程项目功能要求的多样化, 从而导致现代土木工程建设具有城市建设立体化、交通工程快速化、工程设施大型化及改善综合环境人性化的特点。人们不断拓展新的生存空间, 其中水利水电、交通、矿山、能源、港口与航道、城乡建设、国防等领域已广泛应用岩土工程学科的相关成果。这些行业可能在各种地点建造工程, 因此会遇到各种类型的地基或地质环境, 并且针对不同工程 and 不同地质条件又会选择不同的基础或结构形式, 还会开挖隧道、深基坑和建设地下工程, 以及筑坝、筑路、河岸与边坡治理等。

对于不同地基或地质环境下的不同类型工程, 在进行设计、施工时, 在了解岩土体的基本性质和工程要求的基础上, 还必须同时考虑稳定或平衡、应力变形与固结、地下水与渗流、水与土 (岩) 相互作用、土 (岩) 与结构相互作用、土 (岩) 的动力特性等问题。

2. 材料性质的复杂性

岩土是组成地壳的任何一种岩石和土的统称。岩土可细分为坚硬的 (硬岩)、次坚硬的 (软岩)、软弱联结的、松散无联结的和具有特殊成分、结构、状态和性质的五大类。在我国, 习惯将前两类称为岩石, 后三类称为土。其中, 土既包括自然形成的土, 也包括人类生产活动所产生的人为土, 如岩石开挖料、建筑垃圾、尾矿等。岩土既可以松散堆积物的土体形式存在, 也可以相对完整的岩体存在。天然岩体一般存在于各种随机结构面, 因此其力学行为

异常复杂。当岩体破碎时，很难区分其属于岩体还是土体，需要根据地质体的性质和工程经验做出判断和给予恰当描述。现场岩土体大都是非均匀、非连续介质，呈现出空间的不连续性及水环境因素的复杂性，往往表现出强烈的区域性（个性）。岩土材料往往呈现出结构性和各向异性，其变形与强度还可能随时间变化，即流变特性等。因此，岩土材料的力学行为表现出强烈的非线性特征，即岩土材料一般不是线性材料，其应力-应变关系远比单纯的线弹性关系要复杂。

为了如实地表达不同区域的岩土工程问题，应进行必要的勘察、试验，建立一些能够描述各种岩土材料基本性质的非线性或弹-塑性本构模型。当前，岩土的本构模型的建立和应用已经成为近代岩土工程的重要研究领域，至今人们建立的本构模型不少于百种。试图建立能适用于各类岩土工程的理想本构模型是困难的，甚至是不可能的。所以，一方面应努力建立用于针对实际工程问题的实用模型；另一方面应构建能够反映某类岩土体应力-应变特性的理论模型并进行相关的试验测试研究。

3. 荷载条件的复杂性

针对不同的使用目的，人们建造出多种多样的建筑物。不同形式、使用要求或者施工方式的工程，其荷载条件复杂多样。例如，房屋建筑对地基的作用，以建筑物荷载、风荷载为主；基坑开挖、隧洞开挖则以应力解除为主；土石坝施工期是逐级加载以自重为主，运行期则是以水压力和渗流为主；地震、爆炸则是以突加动力荷载为主。

4. 初始条件与边界条件的复杂性

工程地质和水文地质条件、周边环境的不同，会造成各种问题的初始条件和边界条件不同，有时甚至比较模糊，如土体的初始应力或初始变形往往很难得到准确值。边界条件的确定有时也难以完全符合实际，需要进行适当的简化或近似处理。求解工程问题和进行数值模拟时应综合考虑各方面因素，尽可能确切地反映各种复杂的初始条件与边界条件。

5. 相互作用的多样性

相互作用包括两种类型：一是土（岩）与水相互作用，二是土（岩）与结构或颗粒（岩块）相互作用。岩土中水的存在和流动对其性质会产生影响，有时这种影响是巨大的。水的存在除了产生浮力、水压力等静水力学特征外，在发生渗流时将对岩土产生超静孔隙水应力和渗流力。对于细粒土，含水率的变化会使土的物理力学性质发生变化，对于某些特殊土的影响更为显著。对于粗粒土，适当的洒水可以增加土的压实性，土石坝初次浸水，会产生湿化变形。岩土中水的存在和渗流现象，除了影响应力变形外，还可能发生缓慢而持续的化学作用，进一步影响岩土的渗流和应力变形。

除了少数堤坝类的土工建筑物外，一般建筑物还存在结构物，因此在进行相互作用分析时将岩土体与结构物视为一个完整体系，即岩土与结构处于一个共同作用系统中，该分析方法是岩土工程发展的一个重要方向。岩土中，由于土与结构的性质有很大的差异，在相互作用过程中通过力的传递并最终达到变形协调，因此存在岩土与结构的相互作用问题，如地基、基础、上部结构的相互作用，土石坝防渗墙与地基及坝体的相互作用，桩、挡土墙、锚杆、加筋材料等与土（岩）的相互作用。此外，裂隙岩体岩块间的相互接触也是一种相互作用。

1.2 岩土工程仿真分析方法概述

在岩土工程中,按照传统结构力学和弹塑性力学来求解一些问题,可以给出求解域内基本未知函数在假定计算条件下的精确解,此解对求解域内及边界上的无限个点都成立,但包含未知量不多,较简单的问题才能得到这种解,因此具有明显的局限性。工程实践中的岩土工程问题十分复杂,其解析解较难得到,在这种情况下,仿真分析方法应运而生。对材料涉及的复杂性质(非线性的应力-应变关系、非均质和各向异性等)、各种边界条件、任意荷载情况及任意几何形状等工程问题,通过仿真计算可以得到与实际情况近似的解。

仿真分析方法是随着计算机技术广泛应用而形成的一种计算分析方法,包括有限差分法(finite difference method, FDM)、有限单元法(finite element method, FEM)、边界元法(boundary element method, BEM)、离散单元法(discrete element method, DEM)等。目前已有诸多学者对岩土工程数值分析进行了讲解和介绍^[1-5]。因为仿真分析方法能够在较短时间内完成大量计算分析工作,计算成本低、效率高,所以在岩土工程中得到了广泛的应用,具体介绍如下。

1) 有限差分法的基本思想是用差分网格离散求解域,用差分公式将问题的控制方程转化为差分方程,然后结合初始及边界条件,求解线性代数方程组。这种方法直观,易编制程序,所以从20世纪40年代以来,一直被广泛应用。在岩土工程中,已经采用差分法成功地解决了一些渗流及固结问题,如土坝渗流及浸润线的求法、土坝及地基的固结等。在20世纪50年代至60年代初,弹性地基上的梁与板及板桩也用有限差分法来求解。60年代初,由于有限单元法及边界元法的出现,完全依靠有限差分法求解岩土工程问题的工程应用越来越少,但有限差分法与有限单元法等方法的综合应用较为普遍。

2) 20世纪60年代初,有限单元法在岩土工程中得到应用。因为它能够较容易地处理分析域的复杂形状及边界条件、材料的物理非线性和几何非线性等问题,所以有限单元法的应用和发展非常快。有限单元法在土体渗流、固结、稳定和变形分析等各个领域得到广泛应用,它被应用于浅基础、桩基础及各类深基础、挡土墙、堤坝、基坑和隧道等岩土工程问题的分析中。其不仅可用于分析静力问题、动力问题,还可用于分析上部结构、基础和地基的相互作用等问题。有限单元法包括位移型、平衡型、混合型3种。具体如下:①位移型有限单元法以节点位移为基本未知量,以满足各单元内部及其边界上的变形协调的位移函数为基础,且只是在节点处保持力的平衡;②平衡型有限单元法以节点力为基本未知量,以满足各单元内部和边界上任何地方的力的平衡为基础,且只是在节点处才保持位移的协调;③混合型有限单元法为了计算方便,对各个不同部分进行分别处理,分别以某些位移和内力作为未知量。因为位移型有限单元法在计算机上更容易实现复杂问题的系统化,便于用计算机来求解,并易于推广到非线性和动力效应等其他方面,所以现在位移型有限单元法应用更为广泛。此外,由于岩土体是自然形成的,其分布和物理力学性质参数往往具有随机性。为考虑其随机性,随机有限单元法得到了发展,并且被用于分析材料参数、几何形状及荷载所具有的不确定性对岩土体位移、内力与可靠性的影响。影响有限单元分析精度的因素主要有材料本构模型的合理程度和相应的模型参数。

3) 在有限单元分析中既可以采用总应力分析法,也可以采用有效应力分析法。1966年,

Clough 和 Woodward 首先将总应力分析法应用于土坝的应力和应变分析。1969 年, Sandhu 和 Wilson 利用有限单元法分析了比奥二维固结问题, 开创了土木工程有效应力分析有限单元法的先河。目前, 有限单元法在土木工程中的巷道压力、采场地应力、岩层移动和边坡稳定性等研究领域均已得到广泛的应用。已在岩土工程领域推广应用的有限单元通用程序包括 Ansys、Abaqus、FLAC (FLAC3D)、Adina、Marc 等。

4) 20 世纪 20 年代, 边界元法的理论基础就已初步形成。到了 60 年代中期, 随着计算机技术的不断发展与广泛应用, 边界元法在工程技术问题中的应用逐渐引起了人们的注意。尤其是 70 年代末至今, 边界元法发展十分迅速, 并引起了国内外学者的普遍重视。70 年代末 80 年代初, 由于边界元法仅仅离散边界, 仅适合于半无限域问题, 因此无法进一步发展。边界元法的思路是把所要求解的微分方程转化成相应的边界积分方程, 然后用边界积分方程的数值解法求得原问题的数值解。这种方法的特点是通过边界上的量来确定区域内部的未知量。边界元法采用类似于有限单元法的离散技术来离散边界。离散化所引起的误差仅来源于边界, 提高了计算精度。边界元法在分析边坡稳定性、地下水渗流等方面取得了良好的效果。与有限单元法相比, 边界元法具有信息准备工作少、降低所求问题的维数、计算量和计算时间相对减少、计算精度相对提高的特点。但事实上边界元法并没有得到像有限单元法那样广泛的应用, 其原因如下: 一是边界元法对可变系数或非线性问题的适用性不如有限单元法; 二是边界元程序没有较好的前后处理技术, 计算结果体现也不直观和形象。

5) 离散单元法是针对节理岩土体提出的一种适用于模拟岩土体大位移的数值方法。一般从宏观意义上说, 岩土体可以视为连续介质, 从而可以用弹性力学或塑性力学的方法来进行分析和计算, 但是在某些情况下的岩土体却不能视为连续介质, 如地下节理岩土体中的巷道。离散单元法在 1971 年首次由 Cundall 提出, 该法适用于研究在准静态或动力条件下的节理系统或块体集合的力学问题, 主要用来分析岩石边坡的运动。1974 年, 二维的离散单元程序趋于成熟, 具有屏幕输出的交互会话功能, 但由于受计算机内存的限制, 不少程序是用汇编语言编写的, 直至 1978 年程序才全部被翻译成 FORTRAN IV 的文本, 成为离散单元法的基本程序。Cundall 和 Strack 还开发了二维圆形块体的 BALL 程序, 用于研究颗粒块体的力学行为, 所得的结果与 Drescher 等人用颗粒光弹实验的结果极为吻合, 使 BALL 程序在研究颗粒介质的本构方程方面取得了显著成果, 从而进一步确定了离散单元法的力学地位。与二维 BALL 对应的是三维 TRUBALL 程序, 其与二维的不同之处是数据结构, 而基本原理相同。BALL 程序以圆盘作为颗粒的模型, TRUBALL 以球作为颗粒的模型, 分别用于模拟二维和三维状态下散体的力学行为。英国阿斯顿大学近年在发展和应用离散单元法方面做出了杰出的贡献。Thornton^[5]在 Hertz 接触理论的基础上, 综合了 Savkoor、Briggs 和 Deresiewicz、Mindlin 的理论成果, 对颗粒间在考虑粘连力时法向、切向接触力的计算方面做了深入的研究, 形成了一套接触理论。Thornton 根据离散单元法的基本原理, 改进研究出较为成功的三维和二维的离散单元程序。Lemos 于 1983 年开发了离散单元法与边界元法耦合的半平面程序, 并用于计算节理和裂隙介质。Lemos 和 Duvigneault 于 1984 年开发了包括前处理和后处理的离散单元法与边界元法的耦合程序。Lemos 于 1984 年开发了包括一个前处理程序 CREATE、一个与边界元法耦合程序 BOUND 和一个离散单元法程序 BLOCK。

有限单元法与边界元法这两种仿真分析方法是当前应用极为广泛的数值方法。它们具有各自的优点, 前者适用于非均质、非线性等问题的分析; 后者则适用于无限域的计算。因此, 如将两种方法结合起来进行分析, 则可收到取长补短的显著效果。这两种方法的联合使用称为有限单元与边界元的耦合分析。近年来, 有限差分法的研究又有了新发展, 可

以得到任意网格的差分。另外,在某些特定的情况下,有限单元法与差分法、有限单元法与边界元法相结合来处理一个问题,比它们各自求解更具有优越性。总之,这几种方法的相互渗透和相互配合,更能发挥各自的优点,如用边界元法考虑远场应力的影响以模拟弹性的性质,用有限元法作为中间过渡考虑塑性变形,再用离散单元法考虑近场不连续变形的情况,从而极大地扩展了仿真分析方法的解题范围,使求解问题达到了一个新的阶段,也使仿真分析方法解决问题的能力提高到了新的水平。

1.3 岩土工程仿真分析发展的必然性

岩土作为一种地质体,其天然状态、性质使材料的本构关系异常复杂,对其上方的建筑物的荷载条件、边界条件与初始条件,以及土(岩)与水相互作用及土(岩)与结构或颗粒(岩块)间相互作用进行力学描述是非常困难的。在理论上,可通过建立运动微分方程(动力或静力)、几何方程(小应变或大应变)和本构方程,对岩土进行力学描述。对于渗流固结问题,运用有效应力原理,并考虑连续方程,才能求得精确解析解。为尽可能求得问题的精确解,我们设置以下3个过程。

1. 严密理论下的解析解

针对具体问题,建立严格的控制性物理方程(微分方程或微分方程组),然后根据初始条件和边界条件求得基于严密理论下的解析解。由于实际工程问题的复杂性,符合方程要求的结果极少。某些问题定性解答难以把握,较为精确的定量解答更不易获得。

2. 近似的解析解

为了获得较为精确的理论解,人们做了一些必要的简化假设,建立控制物理方程(微分方程或微分方程组),希望从中得到某种近似程度的严密解析解,其中一些解与实际情况能够较好地吻合,如太沙基(Terzaghi)一维固结解答;有一些解则部分符合实际,如温克勒(Winkler)弹性地基上的梁和板解,部分适用于极软弱黏土地基;更多的是与实际有很大的出入。虽然有些问题具有相当的复杂性,但适当地简化假设也能够获得较为符合实际的解析表达式,如比奥(Biot)三维固结方程,但也只有少数特殊情况才能求得解析解。

3. 数值解

因严密理论下的解析解难以获得,因此在简化假设的基础上得到控制物理方程(微分方程或微分方程组)来寻求数值解的方法成为寻求精确解答的有效途径。如前所述,因为岩土工程问题的复杂性,很多情况下不能得到控制微分方程的解析解,所以人们转而寻求数值解。因此,希望获得近似数值解的愿望就成为必然,从而注定了岩土工程仿真分析的地位,这是一个从定性到定量的过程。

数学和力学理论的发展、计算技术和计算机软硬件的快速发展为解决复杂岩土工程问题提供了有效的仿真分析方法和手段。近年来,许多仿真分析方法应运而生,日趋完善,并得到广泛应用,从而解决了大量的工程问题。仿真分析方法为进一步发展岩土工程学科提供了更广阔的空间,也为相关学者和工程师提供了施展才华的舞台。

1.4 岩土工程仿真分析方法的发展

实际的岩体结构既具有大量连续性较强的完整岩石，同时也有破碎的松散岩石。有限单元法把物体当成完全连续介质进行分析求解，而离散单元法、非连续变形分析法（discontinuous deformation analysis, DDA）等则特别强调岩体等的非连续性，采用完全独立分割开来的块体进行分析求解。不论是有限单元法，还是非连续变形分析法，对实际的岩体进行分析均具有较大的局限性。石根华博士于 20 世纪 90 年代初创建的流形法（也称数值流形法）为这类实际问题的处理在理论上提供了一条较好的解决途径。

流形法以拓扑流形和微分流形为基础，具有分开且独立的两套网格，即数学覆盖和物理网格。数学覆盖用于定义近似解的精度，由用户选择且独立于物理网格划分，可以是任何规则或不规则的格子；物理网格则包括材料的边界、裂缝、块体和不同材料区域的交接面，它不能人为选择。用物理网格对数学覆盖再剖分就形成了覆盖材料全域的由流形方法求解的物理覆盖系统。对物理覆盖系统上的每一个物理覆盖可以定义各自独立的覆盖位移函数，然后在几个覆盖的公共区域（即流形单元）内，将其所有覆盖上的独立覆盖位移函数加权求和就能形成适用于该域的总体位移函数。流形法是一种高度统一的数值方法，它用连续的和非连续的有限覆盖系统，把连续的和非连续的变形问题分析融为一体，统一解决了有限单元法、非连续变形分析法和解析法的计算问题。而有限单元法和非连续变形分析法则分别是流形法最特殊的两种形式。

由于有限单元法等基于网格的方法在结构网格的生成、特大变形、奇异性或裂纹节理动态扩展模拟等方面有诸多困难，从 20 世纪 70 年代起，国内外许多学者不断地致力于探索和发展一类新的数值方法——无网格法来解决或至少部分解决单元、网格对数值模拟分析的严格限制。这类无网格法的出现也为岩体稳定性分析所遇到的困难提供了新的、有效的解决途径，即它们不需要网格，在一系列离散的点上构造近似位移函数，避免了网格生成、网格畸变和网格移动引起的问题，从而受到了国际计算力学界和工程界的高度重视。国内学者对无网格法在岩土工程各个领域的应用与研究也做了大量的工作。

无网格法的研究始于 20 世纪 70 年代，但真正引起人们的广泛兴趣并得到迅速发展的时期是 20 世纪 90 年代。经过多年的发展，目前无网格法的种类繁多，介绍其在各个领域应用的文章极多。根据插值近似函数的不同，无网格法主要可以分为 4 类，即基于核函数近似、最小二乘近似、点插值近似和自然邻接点插值近似的无网格法。

总之，岩土工程仿真分析已经随着计算机技术的发展，在岩土工程的各个领域得到了广泛的应用，并为岩土工程问题的分析提供了许多新的分析方法，越来越显示出其非凡的能力和广阔的应用前景。

1.5 岩土工程仿真分析方法的学习及应用

岩土工程是一门应用科学，在岩土工程分析时不仅需要运用综合理论知识、室内外测试成果，还需要应用工程师的经验，才能获得满意的结果。岩土工程仿真分析更讲究应用，要

求人们能够掌握每种方法的基本理论,弄清其来龙去脉及各自特点和适用范围,熟练应用其中一两种方法,并能够熟练使用相关软件或自编程序。另外,加强实践和总结经验教训(哪怕是间接的)也是不可或缺的。

具体工程能否得到计算结果,取决于计算方法的选择和正确实施,包括程序的正确使用;而能否得到合理的结果则取决于计算模型及其参数的选择,以及边界条件、初始条件、相互作用、耦合问题等的正确模拟,这通常是问题的核心。正确模拟,必须对问题进行正确的定性,才能得到准确的量化结果。因此,学习与应用仿真分析方法时必须把握好如下几个方面的关键问题。

- 1) 清楚每种方法的数学力学原理,掌握基本假定和适用范围。
- 2) 清楚每种方法对岩土体材料模型及其参数的要求。
- 3) 清楚每种方法对岩土体材料与结构的相互作用模型及其参数的要求,包括不连续岩石块体之间的关联、相互作用模型与参数。
- 4) 分析初始条件、边界条件和荷载特征等,确定合理的模拟思路。
- 5) 分析岩土体是否存在渗流和与水的相互作用或其他耦合问题。
- 6) 研究反演分析的已知数据,明确待求未知量,选择恰当的方法。

运用任何一种仿真分析方法,都必须先分析拟解决问题的关键所在,具体应用某岩土仿真分析方法时,应注意并厘清如下几个主要环节。

- 1) 研究分析对象,明确计算目的和拟解决的关键问题,选择数值方法,确定建模方案。
- 2) 确定运用的本构模型,合理选择参数。
- 3) 确定边界条件与初始条件。
- 4) 模拟荷载及荷载的动态变化。
- 5) 确定计算的收敛评判依据。
- 6) 考察各环节简化的合理性,否则应调整建模,并审查有关计算模型与参数。
- 7) 确定后处理方法及成果整理的内容与分析方案。

应该指出,虽然岩土工程仿真分析在多数情况下只能给出定性分析结果,但只要模型正确、参数合理,就能得到有价值的量化结果。岩土工程仿真分析对工程决策有重要意义,是解决岩土工程问题的一个重要研究手段。岩土工程仿真分析方法的应用范围很广,并将不断地扩大。

参 考 文 献

- [1] THORNTON C. On the relationship between the modulus of particulate media and the surface energy of the constituent particles[J]. *Journal of physics d: applied physics*, 1993, 26(10): 1587-1591.
- [2] 德赛 C S, 克里斯琴 J T. 岩土工程数值方法[M]. 卢世深, 潘善德, 王钟琦, 等译. 北京: 中国建筑工业出版社, 1981.
- [3] 刘汉东, 张勇, 贾金禄. 岩土工程数值计算方法[M]. 郑州: 黄河水利出版社, 1995.
- [4] 廖红建, 王铁行. 岩土工程数值分析[M]. 北京: 机械工业出版社, 2006.
- [5] 卢廷浩. 岩土数值分析[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2008.

第2章 连续介质力学的基本概念

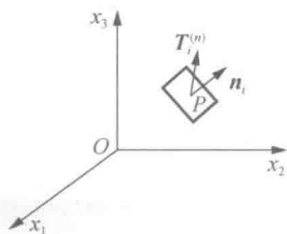
虽然土和岩石是自然的产物,是由固体颗粒、水和气体组成的多相体,并且在微观上是不连续、不均匀与各向异性的。但是,对许多岩土工程问题,人们感兴趣的范围是非常广的,在这个范围中,微观的不均匀性和不连续性的影响能够因平均化而消失,从而使土或岩石的力学性质及其在数学上的特征能够在连续介质力学的基础上进行研究。土力学与土木工程计算的一些基本问题,如地基承载力及地基沉降的计算,滑坡、坑道开挖与挡土墙土压力的计算等,都是解决土介质在外部作用影响下的变形和运动,这些也是连续介质固体力学的基本问题。土力学中描述问题的基本概念和解决问题的基本方法,许多是从连续介质力学中借用或引申出来的。土介质的本构特性虽然比金属材料要复杂得多,但其变形与运动都服从连续介质力学的基本定律——质量守恒定律、动量守恒定律、能量守恒定律等。所以,土力学的研究(连续介质固体力学的一个分支)总是在连续介质力学基本理论的指导下进行,这就是本章在详细阐述土的本构模型之前要重温连续介质力学基本概念的原因。

2.1 应力分析

在土力学理论中,岩石与土都看成连续介质。这样,就可以使用应力和应变的概念,并且弹性力学、塑性力学和黏性力学中所给出的理想化材料中的应力-应变关系也能转用到实际的地质材料中来,用以估计给定的力场中的应力和应变。

2.1.1 一点的应力状态和应力张量

岩土介质中一点的应力可以这样得到,即考虑介质中 P 点处的一小微元 δA , 它的法向单位矢量为 \mathbf{n}_i (图 2.1), 作用在它上面的合力为 $\delta \mathbf{F}_i$ 。当 $\delta \mathbf{F}_i$ 接近于零时, 比率 $\delta \mathbf{F}_i / \delta A$ 的极限称为法向 \mathbf{n}_i 的微元面相关的 P 点的应力矢量 $\mathbf{T}_i^{(n)}$, 有



$$\mathbf{T}_i^{(n)} = \lim_{\delta A \rightarrow 0} \frac{\delta \mathbf{F}_i}{\delta A} \quad (2.1)$$

式中, $\mathbf{T}_i^{(n)}$ 的量纲为 N/m^2 。

图 2.1 P 点微元面上的应力矢量

由于 $\mathbf{T}_i^{(n)}$ 是一个矢量, 所以它能用一个正应力分量和两个剪应力分量表示, 即

$$\mathbf{T}_i^{(1)} = (\sigma_{11} \quad \sigma_{12} \quad \sigma_{13}) = (\sigma_x \quad \tau_{xy} \quad \tau_{xz}) \quad (2.2)$$

$$\mathbf{T}_i^{(2)} = (\sigma_{21} \quad \sigma_{22} \quad \sigma_{23}) = (\tau_{yx} \quad \sigma_y \quad \tau_{yz}) \quad (2.3)$$

$$\mathbf{T}_i^{(3)} = (\sigma_{31} \quad \sigma_{32} \quad \sigma_{33}) = (\tau_{zx} \quad \tau_{zy} \quad \sigma_z) \quad (2.4)$$

式 (2.2) ~ 式 (2.4) 中的 9 个量定义了 3 个应力矢量 $\mathbf{T}_i^{(1)}$ 、 $\mathbf{T}_i^{(2)}$ 、 $\mathbf{T}_i^{(3)}$, 它们称为 P 点