

土木工程研究生系列教材

岩土工程数值分析

廖红建 主 编
王铁行 谢永利 副主编
刘怀恒 主 审

第2版



机械工业出版社
CHINA MACHINE PRESS

土木工程研究生系列教材

岩土工程数值分析

第2版

主 编	廖红建				
副主编	王铁行	谢永利			
参 编	党发宁	任建喜	朱合华	蔡永昌	
	傅鹤林	刘 波	王晓峰		
主 审	刘怀恒				



机械工业出版社

本书是土木工程研究生系列教材之一。全书较系统地介绍了岩土工程问题的数值解析方法的基本理论及其在岩土工程中的应用。内容包括岩土的本构模型、有限差分法、有限元法、边界元法、离散单元法,以及岩土工程非线性问题和固结问题的有限元分析、土体渗流问题和温度场问题的有限元分析、岩体力学有限元分析的若干问题、岩土工程数值分析新进展等。本书综合了岩体、土体材料的数值分析方法及其新进展,加强了在岩体、土体工程中的应用算例,内容较丰富,包含了新的研究成果。

本书既可作为高等院校土木工程、水利水电工程、采矿工程以及交通运输工程等专业的研究生教材,也可供上述专业的大学生以及从事教学、科研、规划、勘察、设计、施工、管理、监理、监测等工作的科技人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

岩土工程数值分析/廖红建主编. —2版. —北京:机械工业出版社, 2009.5

(土木工程研究生系列教材).

ISBN 978-7-111-26299-2

I. 岩… II. 廖… III. 岩土工程-数值计算-研究生-教材 IV. TU4

中国版本图书馆CIP数据核字(2009)第020209号

机械工业出版社(北京市百万庄大街22号 邮政编码100037)

策划编辑:季顺利 责任编辑:任正一

版式设计:张世琴 责任校对:姚培新

封面设计:张静 责任印制:乔宇

北京京丰印刷厂印刷

2009年7月第2版·第1次印刷

168mm×230mm·31.75印张·578千字

标准书号:ISBN 978-7-111-26299-2

定价:48.00元

凡购本书,如有缺页、倒页、脱页,由本社发行部调换

销售服务热线电话:(010) 68326294

购书热线电话(010) 88379639 88379641 88379643

编辑热线电话:(010) 88379729

封面无防伪标均为盗版

土木工程研究生系列教材编审委员会

顾问: (以姓氏笔画为序)

王正宏	任爱珠	朱博鸿	刘怀恒
刘宝琛	刘祖德	沈世钊	沈祖炎
陈英俊	林 皋	欧进萍	周 氏
周锡元	赵国藩	钟善桐	殷宗泽
顾晓鲁	蔡美峰		

主任委员: 江见鲸

副主任委员: (以姓氏笔画为序)

朱合华	李 奇	李宏男	李爱群
杜修力	陈云敏	张永兴	张素梅
尚守平	姜忻良	夏 禾	徐志胜
廖红建			

委员: (以姓氏笔画为序)

卫 军	王 钊	王清湘	卢廷浩
朱召泉	刘晶波	李正良	李英民
李洪泉	李鸿晶	杨果林	吴知丰
陈国兴	张家生	张毅刚	张耀春
郑 刚	单 建	易伟建	周朝阳
赵树德	徐礼华	袁迎曙	康清梁
盛宏玉			

秘书长: 季顺利

土木工程研究生系列教材 序

随着我国高等教育的发展,普通本科教育已由精英式教育发展成为大众式教育。我国科学技术的高速发展,对具有高级专业知识、高级专业技能的专门人才的需求日益迫切,这为硕士研究生教育的发展提供了广阔空间。一些高等院校硕士研究生的招生规模,近年来正以15%~30%的速度发展。对一些研究型的重点高校,在“十五”期间,本科生与研究生的招生比例要大致相当。许多高校已获得工程硕士的培养授权,这为研究生的培养又开辟了新途径。

硕士研究生招生规模的扩大,对传统的研究生教育模式提出了挑战。过去硕士生的培养基本套用博士生的培养模式,主要靠传帮带式的教育模式,而对数量增大的研究生教育,必须建立整建制的培养模式,即要求硕士研究生的教育培养模式向公共化、规范化方向发展。因此,硕士研究生的教材,特别是研究生教育的平台课、学位课的教材建设就显得特别重要了。

机械工业出版社根据当前土木工程研究生教育发展现状,本着“大土木工程”的教育思想,组织国内部分高校土木工程专业的教授,对土木工程研究生用教材建设进行了研讨,并组织编写了土木工程研究生系列教材。为保证教材的编写质量,组织成立了教材编审委员会,聘请了一批学术造诣深、德高望重的专家作顾问和教材主审。本套系列教材编写、出版的思路是:先基础课、平台课教材,后专业课教材。教材由长期给研究生授课的老师合作编写,达到“学校优势互补,质量上乘”的目标。教材体系设计,本着“重基本理论、重学科发展,结合学生现状和人才培养要求”的原则。教材编写质量,本着“出精品、主编负责、主审把关”的原则,符合国务院学位委员会设定的专业要求。

本套系列教材将于2005年陆续出版。我们相信,本套系列教材的出版,将对我国土木工程研究生教育的发展和教学质量的提高及人才培养产生积极作用,为我国经济建设和社会发展作出贡献。

王见鲸

前 言

岩土工程数值分析已成为从事土木工程、水利水电工程、采矿工程、交通运输工程等领域的专业技术人员和研究人员进行岩土工程问题分析的重要手段。随着计算机技术、计算机图形图像技术的发展,数值分析方法和计算机模拟技术在岩土工程中已得到广泛的应用,并且对于岩土工程问题的分析和处理也越来越显示出其非凡的能力和广阔的应用前景。

本书作者在《岩土工程数值分析》(第1版)的基础上作了新的发展和扩充,加强了岩体、土体材料的数值分析和工程算例,加强了数值分析方法在岩土工程不同领域的应用实例,较详细地叙述了岩土工程数值分析方法及其新进展。本书系统性强,循序渐进,包含有新的研究成果和工程应用。岩土工程数值分析是一门土木工程类等相关学科研究生的专业基础课,尤其对岩土工程专业的研究生来说是必修的。

本书由西安交通大学廖红建教授统稿。廖红建编写第1、2、6章;中国矿业大学刘波编写第3章;桂林工业学院王晓峰编写第4章;中南大学傅鹤林编写第5章;西安理工大学党发宁编写第7章;长安大学谢永利编写第8章;西安建筑科技大学王铁行编写第9、10章;西安科技大学任建喜编写第11章;同济大学蔡永昌、朱合华编写第12章。在统稿过程中,研究生韩剑、李涛付出了辛勤劳动,为此,表示衷心的感谢。

本书由西安科技大学刘怀恒教授主审。刘怀恒教授提出了许多修改建议和宝贵的意见,使本书减少了错误,得到了润色,在此表示衷心的感谢。

本书可作为高等院校土木工程、水利水电工程、采矿工程以及交通运输工程等专业的研究生教材,也可供上述专业的大学生,以及从事教学、科研、规划、勘察、设计、施工、管理、监理、监测等工作的科技人员参考。

由于编者水平有限,书中难免有欠妥之处,敬请读者批评指正。

编 者

VII

目 录

土木工程研究生系列教材序

前言

第1章 绪论	1
1.1 岩土工程数值分析的特点和作用	1
1.2 岩土工程数值分析方法概述	1
1.3 岩土工程数值分析新进展	5
第2章 岩土的本构模型	7
2.1 应力应变分析	8
2.2 岩土变形特性	15
2.3 屈服准则与破坏准则	22
2.4 岩土的本构模型	45
2.5 岩土损伤本构理论	70
参考文献	75
第3章 有限差分法与FLAC数值计算	77
3.1 有限差分法的基本概念及有限差分格式	77
3.2 FLAC与FLAC3D基本原理	86
3.3 FLAC与FLAC3D的模型与功能模块	102
3.4 FLAC在岩土工程中的应用实例分析	127
3.5 FLAC3D在岩土工程中的应用实例分析	133
参考文献	143
附录1 浅层承压水井抽水计算数据文件“H4.DAT”命令流分析	145
附录2 岩石边坡稳定性分析建模数据文件“ROCKSL.DAT”	

命令流分析	151
附录3 竖向及水平荷载作用下混凝土桩计算的建模命令流分析	153
附录4 浅埋隧道的开挖与支护建模数据文件命令流分析	164
第4章 有限元法	173
4.1 概述	173
4.2 有限元法的理论基础	176
4.3 有限元法的基本过程	179
4.4 有限元法求解时应注意的几个问题	188
4.5 岩土工程问题常用的几种单元	197
4.6 等参数单元与数值积分	210
4.7 算例	219
参考文献	232
第5章 边界元法	233
5.1 概述	233
5.2 弹性力学问题的边界元解法	233
5.3 弹塑性问题的边界元解法	246
5.4 边界元与有限元耦合计算	252
参考文献	262
第6章 离散单元法	263
6.1 概述	263
6.2 刚性块体模型	265
6.3 变形体模型	277
6.4 三维离散单元法	280
6.5 离散单元法和其他数值方法的耦合	285
6.6 算例	287
参考文献	293
第7章 岩土工程有限元的求解方法	295
7.1 线性代数方程组的解法	295
7.2 岩土工程非线性弹性问题有限元解法	306

岩土工程数值分析

7.3 岩土工程弹塑性问题的矩阵化	314
7.4 岩土工程弹塑性问题的数值解法	320
7.5 岩土工程弹粘塑性问题有限元解法	326
参考文献	329
第8章 固结问题有限元分析	330
8.1 概述	330
8.2 固结问题有限元基本方程	331
8.3 有限元方程求解	345
8.4 大变形固结有限元分析简述	347
8.5 算例	355
参考文献	360
第9章 土体渗流问题数值分析	362
9.1 地下水渗流问题的有限元法	362
9.2 饱和—非饱和土稳态渗流数值分析	369
9.3 饱和—非饱和土非稳态渗流数值分析	377
9.4 算例	385
参考文献	387
第10章 土体温度场的有限元分析	388
10.1 控制方程	388
10.2 采用三角形单元的有限元方法	390
10.3 采用四边形单元的有限元方法	398
10.4 相变的处理	402
10.5 边界条件的处理	404
10.6 非稳态温度场有限单元法求解的特点	405
10.7 算例	406
参考文献	408
第11章 岩体力学有限元分析的若干问题	409
11.1 岩体力学有限元的特点	409
11.2 节理岩体的模拟	413

11.3 锚喷支护模拟.....	417
11.4 无限域单元.....	425
11.5 无拉应力分析及节理非线性分析.....	431
11.6 岩体的弹脆塑性分析.....	434
11.7 强度折减有限元法.....	445
11.8 某大坝工程3 [#] 坝段深层抗滑稳定三维有限元分析	446
11.9 铁路专线下采煤地表沉陷规律有限元模拟研究.....	458
参考文献.....	469
 第12章 岩土工程数值分析新进展	470
12.1 非连续变形分析方法.....	470
12.2 流形方法.....	472
12.3 无网格方法.....	481
12.4 算例及应用.....	487
参考文献.....	492

第1章 绪 论

1.1 岩土工程数值分析的特点和作用

数值分析是随着计算机技术广泛应用而形成的一种计算分析方法，它是一种与实验和理论互为补充的有力、有效的分析工具。在岩土工程中，按照古典结构力学和弹塑性力学来求解一些问题时，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所有无限个点都成立，但这种解仅对包含未知量不多的比较简单的问题才能得到，因此，具有十分明显的局限性。工程实践中的岩土工程问题是十分复杂的，其解析解往往难以得到，在这种情况下，数值计算方法应运而生。对涉及复杂性质（非线性的应力-应变关系、非均质和各向异性等）的材料、各种边界条件、任意荷载情况以及任意几何形状等工程问题，通过数值计算可以得到与实际情况近似的解。

岩土工程数值分析方法按其特点可以分为连续变形分析和非连续变形分析两大类方法，包括：有限差分法、有限元法（Finite Element Method，简称 FEM）、边界元法（Boundary Element Method，简称 BEM）、离散单元法（Discrete Element Method，简称 DEM），以及近年来迅速发展起来的快速拉格朗日分析方法（Free Lossless Audio Codec，简称 FLAC）、非连续变形分析方法（Discontinuous Deformation Analysis，简称 DDA）、数值流形方法（Numerical Manifold Method，简称 NMM）和无网格方法等。由于数值分析方法能够在较短的时间内完成大量的计算分析工作，计算成本低、效率高，因此在大型水利、土木、矿山、隧道、交通等工程的设计分析中起到了重要的作用。随着数值分析方法的不断发展，也为岩土工程的数值分析与模拟提供了新的途径。

1.2 岩土工程数值分析方法概述

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。由于这种方法直观，易编制程序，所以从 20 世纪 40 年代以来，至今仍被广泛应用。在

岩土工程中, 渗流及固结问题在 20 世纪 40 年代后期就开始采用差分法成功地解决了一些问题, 如土坝渗流及浸润线的求解、土坝及地基的固结等。在 20 世纪 50 年代及 60 年代初, 弹性地基上的梁与板、以及板桩也用差分法来求解。20 世纪 60 年代以后, 由于有限元法的灵活性以及边界元法的异军突起, 完全依靠差分法求解岩土工程问题的工程应用越来越少, 但差分法与有限元法等方法的混合应用仍很普遍。

20 世纪 60 年代初, 有限元法在岩土工程中得到应用, 由于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, 所以有限元法的应用和发展非常快。它在土工渗流、固结、稳定和变形分析等各个领域得到广泛应用。它被应用于分析浅基础、桩基础及各类深基础、挡土墙、堤坝、基坑和隧道等各类岩土工程问题。不仅应用于分析静力问题、动力问题、抗震分析, 还应用于分析上部结构、基础和地基的相互作用等问题。有限元法包括位移型、平衡型、混合型三种。位移型有限元法以节点位移为基本未知量, 是建立在满足各单元内部及其边界上的变形协调的位移函数的基础上的, 但只是在节点处保持力的平衡; 平衡型有限元法以节点力为基本未知量, 是建立在各单元内部和边界上任何地方的力的平衡的基础上, 但只是在节点处才保持位移的协调; 混合型有限元法为了计算的方便, 对各个不同的部分分别对待, 区别以某些位移和内力作为未知量。由于位移型有限元法在计算机上更容易实现复杂问题的系统化, 而便于用电算来求解, 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元法应用更为广泛。此外, 由于岩土体是自然、历史的产物, 其分布和物理力学性质参数往往具有随机性, 为了考虑其随机性, 发展了随机有限元法, 运用它可以分析材料参数、几何形状或荷载具有某种不确定性时的位移、内力及可靠性的分析。影响有限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。

在有限元分析中可以采用总应力分析法, 也可以采用有效应力分析法。1966 年, 美国 Clough 和 Woodward 首先将总应力分析有限元法应用于土坝的应力和应变分析。1969 年, Sandhu 和 Wilson 用有限元法分析了 Biot 二维固结问题, 开创了土工有效应力分析有限元法的先河。到目前为止, 有限元方法在矿山工程中的巷道压力、采场地应力、岩层移动和边坡稳定性等研究领域已得到广泛应用, 同时在水利水电工程中的坝基稳定、渗流、高边坡稳定性、过水隧洞及大型地下洞室(电站主厂房)围岩稳定性等研究领域也已得到广泛的应用。目前, 已在工程领域推广应用的有限元通用程序有: Ansys、Flac、Adina、Marc、Sap5 等。这些有限元软件系统齐全, 适用范围广, 能够解决弹-塑性、粘-弹性、弹-粘-塑性、

弹-脆性、弹-粘-脆性、弹-粘-塑-脆性等岩土材料工程问题的计算分析。无论岩土材料处于何种状态，岩土有限元几乎都沿用连续体假设。对没有抗拉能力的岩体节理、裂隙等则可以用模拟不连续面的特殊单元来处理。

20 世纪 20 年代，边界元法的理论基础就已初步形成。到了 20 世纪 60 年代中期，随着电子计算机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已逐渐崭露头角。尤其是自 20 世纪 70 年代末直至现在，发展十分迅速，并引起国内外学者的普遍重视。20 世纪 70 年代末 80 年代初，边界元法异军突起，由于它仅仅离散边界，特别适合于半无限域问题。边界元法的思路是把所求解的微分方程转化成相应的边界积分方程，然后采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，它与有限元法相比，具有信息准备工作少等优点。边界元法采用类似于有限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。边界元法与有限元法相比，具有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，应该说边界元法比有限元法具有更强的生命力。但事实上边界元法并没有得到像有限元法那样广泛的应用。其中原因，一是对变系数或非线性问题的适用性不如有限元法；二是，边界元程序没有较好的前后置处理技术，计算结果表示也不很直观和形象。

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。从宏观意义上说，岩体一般可以视为连续介质，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，岩体却不能视为连续介质，如节理发育的多裂隙的碎裂岩体。1971 年，Cundall 首次提出离散单元法，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，二维的离散元程序趋于成熟，已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。1978 年，程序全部被翻译成 FORTRAN IV 的文本，成为离散单元法的基本程序。与此同时，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 等人用光弹技术的实验结果极为吻合，使 BALL 程序在研究颗粒介质的本构方程方面大放异彩，从而进一步确定了离散单元法在力学中的地位。与二维 BALL 对应的有三维 TRUBALL 程序，与二维的不同之处只是数据结构，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。近年来，英国 ASTON 大学在发展和应用离散单元法方面作出了杰出的贡献。

Thornton 在 Hertz 接触理论的基础上,综合了 Savkoor、Briggs 和 Mindlin、Deresiewicz 的理论成果,对颗粒间考虑粘连力时法向、切向接触力的计算方面作了深入的研究,形成了自己的一套接触理论。经过 Thornton 和科研人员共同努力,根据 DEM 的基本原理,改进研究出较为成功的三维和二维的离散元程序。1983 年, Lemos 开发了离散单元法与边界元法耦合的半平面程序,并实际应用于计算节理和裂隙介质中的应力分布问题。1984 年, Lorig 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,其功能更强,包括一个前处理程序 CREATE,类似于有限元法中的自动划分网格,一个与边界元法耦合程序 BOUND 和一个离散单元法程序 BLOCK。

离散单元法原理虽然比较简单,但在解决非连续介质大变形问题时却非常实用。由于离散单元法具有更真实地表达节理岩体几何特点的能力,便于处理以所有非线性变形和破坏都集中在节理面上为特征的岩体破坏问题,因而被广泛地应用于模拟边坡、滑坡和节理岩体地下水渗流等岩土力学过程的分析 and 计算中。可以说,离散单元法自问世以来,在岩土工程这个应用领域中发挥了其他数值方法不可替代的作用,它已扩展到用于研究地震、爆炸等动力过程和地下水渗流、热传导等物理过程。

有限元与边界元这两种数值分析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。因此在应用中,如将两种方法结合起来进行分析,则可收到扬长避短的显著效果。这两种方法的联合使用称为有限元与边界元的耦合分析。近来差分法又有了新发展,任意网格的差分,使它又可以与有限元匹敌。另外,在某些特定的情况下,有限元法与差分法、有限元法与边界元法相结合来处理一个课题,比它们各自求解更显示出优越性。总之,这几种方法的相互渗透和相互配合,更能发挥各自方法的优点,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,从而极大地扩展了数值方法的解题范围,使得求解问题达到了一个新的阶段,使数值方法解决问题的能力提高到新的水平。

石根华博士于 20 世纪 80 年代提出了一种平行于有限元法的基于隐式算法的非连续变形分析 (DDA) 方法,该方法基于最小势能原理建立系统平衡方程式,选择位移为联立方程式的未知数,把刚度、质量和荷载的子矩阵加到联立方程的系数矩阵中去;它采用有限元类型的网格,但所有单元均由已存在的不连续缝所切割的块体分割而成。DDA 方法以严格的经典力学规则为基础,考虑了块体自身的变形及运动,避免了离散单元法难于达到稳定的缺点,能够较方便地用于非

连续体的平衡和运动学分析。

1.3 岩土工程数值分析新进展

实际的岩体结构既具有大量连续性较强的完整岩石, 同时也会碰到破碎的松散岩石。有限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、DDA 法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。不论采用有限元法还是 DDA 法等非连续分析方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 年代初发展的流形方法(也称数值流形方法)为这类实际问题的处理从理论上提供了一条较好的解决途径。

流形方法以拓扑流形和微分流形为基础, 它有分开的且独立的两套网格: 数学覆盖和物理网格。数学覆盖定义近似解的精度, 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。物理网格对数学覆盖再剖分就形成了覆盖材料全域的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应于该域的总体位移函数。流形方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, 统一解决了有限元、非连续变形分析(DDA)和解析法的计算问题。而有限元法和 DDA 法则分别是流形方法最特殊的两种形式。

作为一种具有先进理论和良好发展前途的新的数值方法, 流形方法已经在岩土工程分析中得到了较为广泛的关注和应用; 但由于流形方法是一种新的数值方法, 其应用范围还比较狭窄, 还有较多的问题与困难需要克服和解决, 特别是被裂缝或块体切割时流形方法物理覆盖系统的自动形成方法仍很不成熟。

由于有限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面临的困难, 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——无网格方法(Element-free/Meshless)来解决或至少部分解决单元、网格对数值模拟分析的严重限制。这类无网格方法的出现也为岩体稳定性分析遇到的困难提供了新的、有效的解决途径, 它们不需要网格, 在一系列离散的点上构造近似位移函数, 克服了网格生成、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。国内的学者对其在岩土工程各个领域的应用与研究也做了大量的工作。

无网格方法的研究始于 20 世纪 70 年代，但真正引起广泛兴趣并得到迅速发展的时期却是 20 世纪 90 年代。经过十多年的发展，目前无网格方法的种类已十分繁多，在各个领域发表的相关文章至少也有几百篇。根据插值近似函数的不同，无网格方法主要可以分为四大类：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方法。

总之，岩土工程数值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。

第2章 岩土的本构模型

岩土工程的数值分析,离不开岩土材料的本构关系。岩土工程问题数值分析的精度在很大程度上取决于所采用的本构模型的实用性和合理性。

本构关系广义上是指自然界中某作用与由该作用产生的效应两者之间的关系。如电学中电压与电流的关系、力学中力与变形之间的关系、热学中温差与热流之间的关系、水力学中水力梯度与渗流之间的关系等。本章将要讨论的是岩土の力学本构关系,即岩土の应力-应变关系。描述岩土の本构关系的数学表达式称为岩土の本构方程,或岩土の本构模型。一般将本构模型分为以下几类:弹性模型、弹塑性模型、粘弹塑性模型、内蕴时间塑性模型和损伤模型等。

要研究材料的塑性本构关系和塑性极限荷载,首先要建立材料产生屈服与破坏的条件和准则。本章将介绍各种经典的和近些年来提出的各种适于岩土类材料的屈服与破坏准则,并对这些准则从理论与实践方法上进行评价。这些准则包括屈瑞斯卡屈服准则、米赛斯准则、摩尔-库仑屈服准则、辛克维兹-潘德准则以及俞茂宏提出的双剪应力屈服与破坏准则。

在实际工程中岩土体常常具有很复杂的应力-应变特性,如非线性、弹性、塑性、粘性以及剪胀性、应变硬化(软化)、各向异性等,同时应力路径、应力历史以及岩土的状态、组成、结构和温度等均对其有不同程度的影响。因此为了反映岩土体真实的力学性状,必须建立较为复杂的本构模型。而在实际工程应用中,在满足一定的精度条件下,又要求本构模型简单实用。因此,目前的本构理论研究呈现两种倾向:一种是建立用于解决实际工程问题的本构模型;另一种则是比较精细的模型的研究,目的在于进一步揭示岩土体应力-应变特性的内在规律。

随着近几十年来电子计算机、计算方法和土工测试技术的发展,使得较复杂的本构模型用于解决工程问题成为可能。同时,在工程实践的推动下,借助于先进的计算方法和手段,也促进了本构理论研究的快速发展。