普通高等教育“十五”国家级规划教材

工程地质数值法

何满潮　主编

黄润秋　王金安　姚磊华　王树仁　副主编

科学出版社

北　京

内 容 简 介

工程地质数值方法是地质工程、岩土工程、地下工程、水利工程、采矿工程、铁道工程、公路工程、石油工程等诸多学科的专业基础课.

本书是普通高等教育“十五”国家级规划教材,其内容涵盖了主要工程地质问题(边坡、基坑、硐室、采矿等)的数值分析方法,如弹性有限元法,大变形有限元法,有限差分法,非连续体离散元法,工程地质问题反分析法及其他数值方法.本书还用文本和光盘形式给出了相关实例的分析过程和分析结果.因此,本书是一本体现了工程地质特色的工程地质数值方法教材.

本书可作为与地质工程相关领域的本科生教材,也可作为研究生、科研院所的工程技术人员的参考书.

图书在版编目(CIP)数据

工程地质数值法/何满潮主编. —北京:科学出版社,2006
(普通高等教育“十五”国家级规划教材)
ISBN 7-03-017090-3

Ⅰ. 工… Ⅱ. 何… Ⅲ. 工程地质-计算方法-高等学校-教材
Ⅳ. P642

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2006)第 028794 号

责任编辑:毕 颖 姚莉丽 / 责任校对:陈丽珠
责任印制:张克忠 / 封面设计:陈 敬

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

中国科学院印刷厂印刷
科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2006 年 4 月第 一 版 开本:B5(720× 1000)
2006 年 4 月第一次印刷 印张:18
印数:1—4 500 字数:341 000

定价:28.00 元(含光盘)

(如有印装质量问题,我社负责调换〈科印〉)

序

工程地质的研究对象是大尺度的工程岩土体．在漫长的地质历史过程中，工程岩土体经受了地质建造和构造运动的改造作用，层面、断层和节理、裂隙等结构面渐趋发育，工程岩土体损伤程度累积加强，非均质、非连续和各向异性强化．地质历史上的每一次构造运动和两次构造运动之间的相对平静期，相当于给岩土体周而复始的加载和卸载，直到现在仍未停息，海岭的扩张和板块的运动就是很好的例证．在加卸载条件下，工程岩土体的力学特性表现出与应力路径、应力状态及加卸载的时间、空间状态变化密切相关．针对这样一种复杂多变的工程岩土体，仅用解析方法求解是困难的．工程地质问题的复杂性，决定了采用数值分析方法的必要性和重要性．随着社会进步和科技水平的提高，人类工程活动的规模也在扩大，工程建设逐渐朝着高、深、大、难的方向发展，从而使工程地质学面临的问题更加复杂，这就迫切需要把数值分析方法引入到工程地质分析领域来．

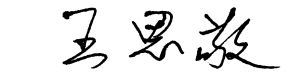
工程地质数值方法不能等同于数值法，它是以工程地质分析为主导，以数学、力学理论为基础，以计算机技术为手段的工程地质的数值分析方法．它不仅能模拟工程岩土体复杂的力学与结构特性，还可方便地分析各种边值问题和施工过程，并对工程岩土体稳定性问题进行预测预报．它拓展了传统的工程地质领域，而且为成功地解决许多重大工程地质问题奠定基础，从而使工程地质分析在定量评价和预测的方面跨越了一大步．

近年来，计算机被广泛应用于工程地质研究，加快了工程地质问题定量研究的步伐，深化了对工程岩土体稳定性问题的理解．然而，对复杂工程岩土体的数值分析，计算结果的可靠性在很大程度上取决于对工程地质条件的掌握、正确理解和合理概化．因此，地质调查、工程地质条件研究和工程地质问题的定性分析，永远处于工程地质体数值方法研究的主导地位，而先进数值方法的正确使用将对工程地质的研究起到验证和深化的重要作用．

无论是进行地质分析还是力学机制分析，都需要深入地观察和研究地质现象．通过仔细的观察、对比和分析，就可以将现象产生的地质条件、空间环境、时间序列等区分出来，这样就可以透过现象认识地质营力多因素作用的力学机制和发展变化的全过程．有些野外观察是难以用室内模拟所代替的，如地应力场、地应力集中所造成的一些现象等．所以，野外地质调查所获得的资料，是工程地质数值分析所应依据的最基本的第一手资料．

对于工程地质问题的研究，还应重视随工程活动和时间的变化，重视工程岩土体中节理、裂隙等各种不连续面的扩展力学过程的数值仿真模拟，并根据实际岩体的赋存环境和工程因素影响情况，确定用于数值分析的计算力学参数．因此，利用工程现场的实测位移，进行位移反分析来获取数值分析的力学参数将仍是数值分析获取中较符合实际的有效方法之一．

近年来，经过广大工程地质和岩土工程工作者的共同努力，工程地质数值分析方法取得了长足的进展，在工程实践中得到了越来越广泛的应用．由何满潮教授主编的这本教材，展示了目前工程地质数值法的现状和发展方向．教材不仅系统地介绍了国内外数值分析方法的基本原理和方法，还针对常见的工程地质问题提供了丰富的分析实例，并附有辅助教学光盘，充分体现了基础性、通用性、实用性、系统性和先进性．我深信它将对我国工程地质数值分析方面的教学和科研起到积极的推动作用．



中国工程院院士

国际工程地质与环境学会原理事长

2006 年 1 月于北京

前　言

工程地质数值方法是应用数值分析手段来解决与工程相关的地质体稳定性问题的一种方法．工程地质体稳定性问题包括了地面建筑工程中地基岩土体稳定性问题，露天矿山开采工程中边坡稳定性问题，地下开采工程中井巷围岩稳定性中的地质问题，水利工程中的坝基与库岸边坡稳定性问题，地震工程中的区域地壳稳定性问题等．工程地质数值法的应用范围涉及采矿工程、岩土工程、石油工程、水利工程、交通运输工程、城市建设和地下工程等众多工程学科．因此，本书作为普通高等教育“十五”国家级规划教材，是适用于各类工程地质领域的一部全国通用教材．本书的编写有如下特色：

一、基础性

工程地质数值法注重加强学生基础理论、基本知识和基本技能的教育．基础理论涉及各种数值分析基本原理的介绍，基础理论和基本知识涉及各种数值分析的基本原理、与工程地质问题相关专业的基础知识介绍等，基本技能是让学生学习和掌握解决工程地质问题的数值分析方法．

二、通用性

工程地质数值法的编写教师分别来自不同高校的多个学科，编写内容和应用范围涉及众多工程学科的多个专业，因此，不同行业、不同领域的大专院校或科研院所，都可以根据各自的特点和需要，对本书的内容有选择地进行讲授．

三、实用性

本教材突出工程地质的特色，以大量的工程实例展开数值法的学习和应用，强调基本理论、基本知识和基本技能的教育，并配套光盘信息技术，使本科生学以致用、学了会用、学了能用，在实战中提高分析问题、解决问题的能力．

四、新颖性

本书的编排方式、方法比较新颖，理论、方法和实例分析紧密结合．书末配套的光盘中，附有大量的工程应用实例．通过实例讲解，以简明易懂的方式，让学生学习掌握一门技能，并了解当今数值方法的发展趋势，为学生以后结合自己专业的学习指明方向．

五、先进性

工程地质数值法紧密结合工程实践中的工程地质问题，将源自最近的在科研课题或现场实际问题中应用数值方法的最新成果汇编在一起，作为普通高等教育的教材，体现了与时俱进的先进性．有些内容的难度较大，如用张量描述的大变

形有限元法是具有我国自主知识产权的数值方法软件系统，还有一些三维分析和渗流分析等，这部分内容以“*”标出，只作为本科生教学的参考和选修内容.

本教材由何满潮任主编，由黄润秋、王金安、姚磊华、王树仁任副主编. 由中国地质大学、中国矿业大学、成都理工大学、北京科技大学、黑龙江科技学院、中国石油大学、东北大学、北京工业大学和湖南大学共九所高校的教师参与编写. 各章节编写分工为：前言、第一章——何满潮；第二章——何满潮、姚爱军；第三章——黄润秋、许强（3.1，3.2，3.3）、高延法（3.4，3.5）、王金安(3.6)；第四章——何满潮、陈新；第五章——王金安（5.1，5.2，5.3，5.4，5.5）、王树仁（5.6）；第六章——王述红、王泳嘉（6.1，6.2）、武雄（6.3）、王金安（6.4）、王树仁（6.5）；第七章——王芝银（7.1，7.2）、姚磊华（7.3，7.4）；第八章——王树仁、韩雪（8.1）、姚磊华（8.2，8.3，8.4）. 全书由何满潮统编定稿，并由黄润秋、王金安、姚磊华和王树仁等一起负责全书终审.

高等教育教材改革是一件大事，也是一件难事. 在和同行们多次讨论和茶余饭后的交谈中，共同感觉到应该编写一本本科生学了能用的工程地质数值法教材. 本教材申报“十五”国家级规划教材并获批准之后，编委会先后召集了八次会议予以充分的讨论，最后敲定了以工程地质为特色、理论联系实例为主线的工程地质数值法编写大纲，此后又数易其稿. 虽已殚精竭虑，但仍有如履薄冰之感，毕竟本教材的编写方法仅仅是一个教材改革的大胆尝试，因此，书中的不妥之处，敬请同行们不吝赐教.

何满潮

2006 年元月于北京

目　　录

序
前言
第一章　绪论…… 1
1.1　工程地质数值法发展概况 …… 1
1.2　工程地质数值法应用前景 …… 5
参考文献 …… 7
第二章　工程地质问题及数值分析方法…… 9
2.1　工程地质问题 …… 9
2.2　工程地质体结构类型与数值分析方法 …… 12
2.3　工程地质数值分析的关键问题 …… 13
2.4　工程地质数值分析基本步序 …… 19
习题与思考题 …… 22
参考文献 …… 22
第三章　弹塑性有限元法 …… 24
3.1　基本原理 …… 24
3.2　基本方法 …… 47
3.3　三峡船闸高边坡稳定性分析 …… 52
3.4　软岩巷道底臌弹塑性分析 …… 63
3.5　开采沉陷弹塑性分析 …… 78
3.6　黄土地基沉降分析 …… 87
习题与思考题 …… 91
参考文献 …… 91
第四章　大变形有限元法 …… 92
4.1　基本原理 …… 92
4.2　基本方法 …… 108
4.3　梁的弯曲大变形分析 …… 115
4.4　软弱夹层剪切大变形分析 …… 116
4.5　岩块转动大变形分析 …… 121
4.6　采场顶板垮落大变形分析 …… 125

习题与思考题 …… 128
参考文献 …… 128
第五章 有限差分法 …… 129
5.1 基本原理 …… 129
5.2 基本方法 …… 135
5.3 基坑锚杆支护稳定性分析 …… 138
5.4 开采矿塌陷区渗流场分析 …… 140
5.5 地下开采诱发矿震数值模拟分析 …… 144
*5.6 露天与井工复合采动三维边坡稳定性分析 …… 150
习题与思考题 …… 158
参考文献 …… 158
第六章 非连续体离散元法 …… 160
6.1 基本原理 …… 160
6.2 基本方法 …… 168
6.3 古滑坡稳定性分析 …… 179
6.4 地震作用下岩质边坡稳定性分析 …… 184
6.5 硐室开挖渗流场分析 …… 188
习题与思考题 …… 192
参考文献 …… 192
第七章 工程地质问题反分析法 …… 194
7.1 岩石力学反分析原理与方法 …… 194
7.2 隧道围岩力学参数反分析 …… 207
7.3 渗流力学参数反分析原理与方法 …… 222
7.4 渗流力学参数反分析算例 …… 229
习题与思考题 …… 235
参考文献 …… 235
第八章 其他数值方法 …… 238
8.1 颗粒元法 …… 238
8.2 数值流形元法 …… 249
8.3 随机有限元法 …… 259
8.4 边界元法 …… 270
习题与思考题 …… 277
参考文献 …… 277

第一章　绪　　论

1.1　工程地质数值法发展概况

随着计算机技术的飞速发展，以数学、力学理论为基础，以工程地质分析为指导，以计算机技术为手段的工程地质数值分析方法，拓展了传统的工程地质领域，成功地解决了许多重大工程地质问题，使工程地质向定量评价和预测的前进道路上跨越了一大步.

传统工程地质学的主要任务是查清与工程相关区域的工程地质条件，而不同的工程地质条件对于不同类型的工程又会产生各种工程地质问题，需要专门研究，以保证工程建设的经济性和安全性. 随着人类社会的进步和科学技术水平的提高，人类工程和经济活动的规模也在扩大，工程建设逐渐朝着高、深、大、难方向发展，从而使工程地质学所面临的问题更加复杂和困难，这就迫切要求把计算科学更多地引入到工程地质学领域[1].

由于数值计算方法大大加强和拓宽了人们解决工程问题的能力，从而成为工程地质学的一个重要分支. 本书将介绍工程地质中常用的几种数值分析方法：有限元法、有限差分法、离散元法、数值流形法以及工程地质问题反分析法.

1.1.1　有限元法

有限元法（FEM）视工程岩体为连续力学介质，通过离散化，建立近似函数把有界区域内的无限问题简化为有限问题，并通过求解联立方程，对工程问题进行应力与变形分析[2~5].

工程地质领域常用的有限元法软件有 ANSYS、RFPA、2D-σ、3D-σ 等.

有限元法将要分析的连续力学介质，假想地将其分割成有限个单元所组成的组合体. 这些单元仅在顶角处相互连接，称这些连接点为节点. 离散化的组合体与真实弹性体的区别在于：组合体中单元与单元之间的连接除了节点之外再无任何关联. 但是这种连接要满足变形协调条件，即不能出现裂缝，也不允许发生重叠. 显然，单元之间只能通过节点来传递内力. 通过节点来传递的内力称为节点力，作用在节点上的荷载称为节点荷载. 当连续体受到外力作用发生变形时，组成它的各个单元也将发生变形，因而各个节点要产生不同程度的位移，这种位移称为节点位移. 在有限元中，常以节点位移作为基本未知量，并对每个单元根据

分块近似的思想，假设一个简单的函数近似地表示单元内位移的分布规律，再利用力学理论中的变分原理或其他方法，建立节点力与位移之间的力学特性关系，得到一组以节点位移为未知量的代数方程，从而求解节点的位移分量，然后利用插值函数确定单元集合体上的场函数．显然，如果单元满足问题的收敛性要求，那么随着缩小单元的尺寸，增加求解区域内单元的数目，解的近似程度将不断改进，近似解最终将收敛于精确解．

有限元法求解问题的主要计算步骤为：

(1) 离散化

首先，应根据连续体的形状选择能描述连续体形状的单元．常见的单元有：杆单元，梁单元，三角形单元，矩形单元，四边形单元，曲边四边形单元，四面体单元，六面体单元以及曲面六面体单元等．其次，进行单元划分，单元划分完毕后，要将全部单元和节点按一定顺序编号，每个单元所受的荷载均按静力等效原理移植到节点上，并在位移受约束的节点上根据实际情况设置约束条件．

(2) 单元分析

所谓单元分析，就是建立各个单元的节点位移和节点力之间的关系式．

(3) 整体分析

整体分析是对各个单元组成的整体进行分析．它的目的是要建立起一个线性方程组，来揭示节点外荷载与节点位移的关系，从而用来求解节点位移．

有限元法不仅可以求结构体的位移和应力，还可以对结构体进行稳定性分析和动力分析．有限元法几乎可适用于所有的计算领域，但对于大变形问题、岩体中不连续面、无限域和应力集中等问题的求解还不理想．近年出现的随机有限元法，为数值方法进行风险评价提供了便利的手段．

1.1.2 有限差分法

有限差分法的基本思想是将基本方程和边界条件下的微分方程改换成代数方程求解，差分法又分为隐式差分和显式差分[6~10]．

FLAC (fast Lagrangian analysis of continua，连续介质快速拉格朗日分析) 基于有限差分原理研制推出的显式有限差分程序，能有效模拟随时间演化的非线性系统的大变形力学过程．

FLAC 的基本算法即是拉格朗日差分法，是一种利用拖带坐标系分析大变形问题的数值方法，利用差分格式按时步积分求解．对于某一个节点而言，在每一时刻它受到来自其周围区域的合力的影响．如果合力不等于零，节点就会失稳而产生运动，从而可以在一个时步中求得速度和位移的增量．对于每一个区域而言，可根据其周围节点的运动速度求得它的应变率，然后根据材料的本构关系求得应力的增量．由应力增量求出 t 和 $t+\Delta t$ 时刻各个节点的不平衡力和各个节点

在 $t+\Delta t$ 时的加速度. 积分加速度, 即可求出节点新的位移值, 从而计算出各节点新的坐标值. 同时, 由于物质的变形, 网格单元发生局部的平均整旋或整旋, 只要计算出相应的应力改正值, 通过应力叠加即可得到新的应力值. 以此作为一个计算循环, 按时步依次进行下一循环计算, 直至问题收敛.

求解时采用了动态松弛法, 不必解大型的联立方程组. 它不但能处理一般的大变形问题, 还能模拟岩体沿结构面的滑动变形. 由于采用了显式差分算法, 对弹塑性和大变形问题, 运算速度大大提高.

FLAC 最早由美国 Itasca Consulting Group Inc. 开发, 现已从两维计算拓展到三维计算. 目前该软件在国外已被广泛应用于工程地质、岩土力学以及构造地质学和采矿学等研究领域. 国内于 20 世纪 90 年代初才引进该软件, 主要应用于工程地质和岩土力学分析, 如矿体滑坡、煤矿开采沉陷预测、采矿巷道稳定性研究等, 在地质学方面的应用刚刚起步.

1.1.3 离散元法

离散元法将非连续性力学介质离散为多边形块体单元, 块与块之间没有变形协调的约束, 只需满足平衡方程. 基于牛顿第二定律并结合不同本构方程, 允许刚体或可变形体间的位移, 变形可以是不连续的过程[11~15].

离散元法也像有限元法那样, 将区域划分成单元. 但是, 单元因受节理等不连续面控制, 在以后的运动过程中, 单元节点可以分离, 即一个单元与其邻近单元可以接触也可以分开. 单元之间相互作用的力可以根据力和位移的关系求出, 而个别单元的运动则完全根据该单元所受的不平衡力和不平衡力矩的大小按牛顿运动定律确定.

离散元法是一种显式求解的数值方法. 该方法与在时域中进行的其他显式计算相似. "显式" 是针对一个物理系统进行数值计算所用的代数方程式的性质而言. 在用显式法时, 假定在每一迭代时步内, 每个块体单元仅对其相邻的块体单元产生力的影响, 这样, 时步就需要取得足够小, 以使显式法稳定. 由于用显式法时不需要形成矩阵, 因此可以考虑大的位移和非线性, 而不必花费额外的计算时间.

离散元法于 1971 年由 P. A. Cundall 首先提出. 1974 年二维的程序趋于成熟. 目前, 已有比较成熟的三维程序, 并用于岩体的破坏分析. 离散元法适用于求解非连续介质大变形问题, 在节理化岩体、碎裂结构岩质边坡的变形和破坏过程分析中得到了广泛应用.

1.1.4 数值流形法

石根华通过研究 DDA 与有限元的数学基础, 于 1995 年提出 DDA 与有限

元的统一形式——数值流形方法．它是利用现代数学——“流形”的有限覆盖技术建立起来的一种数值分析方法，统一解决了连续与非连续变形的力学问题[16~19]．

所谓“流形”是把许多个别的重叠区域连接在一起，去覆盖全部材料体．流形方法具有独立的数学覆盖和物理网格，数学覆盖决定近似解的精度，作为实际的材料边界、裂缝等物理网格决定其积分区域．数学覆盖由用户选择，由占整个材料体的许多有限重叠的覆盖组成，常规的网格和域都可转换为有限数学覆盖．物理网格包括材料体的边界、裂缝、块体和不同材料区域的交界面，物理覆盖是由数学覆盖和物理网格两者组成，物理网格将数学覆盖划分成完全不连续的区域，这些区域就被定义为物理覆盖，它是物理网格对数学覆盖的再剖分，流形单元由若干物理覆盖的交集组成．数学覆盖、物理覆盖、组成数学覆盖网格单元的数学覆盖编号以及组成流形单元的物理覆盖编号之间存在密切关系，并由此组成流形元覆盖系统．

在数值流形方法中，只要用不同的覆盖组合，就可以解决比有限元和 DDA 更具有普遍意义的复杂问题．数值流形方法的特点是：(1) 所用有限覆盖系统，可将连续体、节理及块体材料用这种通用的方法进行计算；(2) 由于数学覆盖能够进行移动、分开（分离）和容易消去和增加，使得通过移动覆盖，逐步计算大变形和移动边值问题（如滑坡问题，节理和块体的运动等）．由于数值流形方法是新近发展起来的一种数值方法，所以该方法的进展值得关注．又由于数值流形方法可模拟岩石块体的移动、张开、闭合等运动过程，因而可对岩体的局部与整体稳定性作出评判，但在岩体参数选取等方面有一定局限性．

1.1.5 工程地质问题反分析法

工程地质和岩土工程问题的反分析方法是 20 世纪 70 年代初发展起来的一种由现场量测信息确定地层初始地应力和各类计算参数的分析方法[20,21]．

位移反分析法按照其采用的计算方法又可分为解析法和数值法（有限元法等）．由于解析法只适于简单几何形状和边界条件的问题反演，因此，对于复杂的岩土工程和工程地质问题，数值法具有普遍的适应性．

早期的反分析方法均是确定性方法，由于工程地质问题涉及的地层范围内，岩层的物理力学参数及力学行为常受到多种不确定因素的影响，因此，非确定性反分析方法应运而生．应用概率论、数理统计、随机过程或模糊数学等不确定性数学工具，来分析量测位移或量测应力值的不确定性、本构模型的非确定性，并基于随机、模糊数据构建非确定性优化反演模型，由此进行非确定性反分析．这种反演分析的目的和内容与前述的确定性反分析基本相同，按其求解的主要过程可归属于优化反演方法类．对于量测信息离散性、模糊性和随机性较大，且计算

本构模型事先未知而不确定的情况，这种非确定性优化反分析方法，具有良好的计算效果.

1.2 工程地质数值法应用前景

当今工程建设朝着高、深、大、难的方向发展，伴随其出现的工程地质问题越来越复杂，要求工程地质工作者，不仅要给出定性的分析结论，而且要通过处理复杂、海量的工程地质数据与信息，给出可视化的定量分析结果. 因此，工程地质数值方法成为有效解决工程地质问题的一种手段. 目前，工程地质数值方法正朝着智能化和专业化的方向发展.

1.2.1 数值法专业化趋势

与钢铁、玻璃等材料相比，地质体具有更为复杂的工程力学性质. 地质体是在漫长地质历史时期形成的复杂体系，它不仅表现在岩性的复杂多变，还表现在地质结构面的千差万别，而且这些因素随着时间和空间都在不断变化，因此，通过理论的本构关系和计算模型来模拟这种复杂的过程与现象就不可避免地存在偏差. 同时，人们对地质体的认识仍在不断深化和发展，有一些问题目前仍不能很好地认识和解决. 随着对本构关系研究的不断深入，能更真实反映工程地质体的本构关系，对于数值分析方法将是一个更大的促进. 因此，通用数值法的软件要解决专业化的实际工程问题，就必须在通用平台的基础上向着专业化的方向发展，即通用软件具有专业化极强的功能模块.

地质工程对于数值分析方法提出了专业化的要求. 例如，工程地质数值法中，本构关系必须具有弹塑性、流变等模块，以反映岩石工程实际的力学响应特性；对于锚杆支护、锚网喷支护和复合支护等多种岩土工程中特有的作业方式，需要专业化数值分析模块的支持等.

1.2.2 可靠性分析的引入

计算参数的选取在很大程度上决定了计算结果的精确程度. 由于计算参数的随机性和不确定性，它们的选取就成为工程地质数值分析中的关键问题之一. 因此，对输入参数必须进行适当的统计处理，从概率分析和可靠性分析的角度提供计算参数. 同时，由于对地质体缺乏充分的认识，边界条件、初始条件的确定等方面往往因人而异. 在工程地质研究中，数值模型引入可靠度的理论，数值模拟的结果为风险分析提供必备的数据. 随机有限元在岩土工程中的应用和推广，使我们看到了可靠度分析理论在岩土工程问题上应用的前景.

1.2.3 数值分析软件的发展

数值模拟软件的发展取决于数学模型及计算机技术的发展. 模型是数值模拟软件的内在核心, 数值模拟软件是模型实现的技术手段. 模型的发展将会扩大软件的适用范围, 提高数值模拟的精确度. 软件技术的应用将大大提高数值模拟软件的速度、质量及水平. 目前, 计算机技术呈现日新月异的发展态势并深刻影响着科学技术的各个领域, 成为近年来数值模拟软件发展的主要动力和特征, 表现为:

(1) 软件结构正由模块式向组件式的方向发展. 这将使软件系统更易局部更新, 适用范围更广, 灵活性更强, 也使用户可以方便地将自己编制的模型程序嵌入这类软件中.

(2) 与 CAD 软件的无缝集成. 与通用 CAD 软件的集成使用, 即在用 CAD 软件完成结构设计后, 自动生成有限元网格并进行计算. 如果分析的结果不符合设计要求, 可重新进行构造和计算, 直到满意为止, 从而极大地提高了设计水平和效率. 今天, 工程师可以在集成的 CAD 和数值模拟软件环境中快捷地解决一个在以前无法应付的复杂工程分析问题. 所以当今所有的商业化数值模拟软件系统商都开发了和 CAD 软件 (例如 AutoCAD、Pro/Engineer、Unigraphics、SolidEdge、SolidWorks、IDEAS 等) 的接口.

(3) 软件前后处理功能越来越强. 随着数值分析方法的逐步完善, 尤其是计算机运算速度的飞速发展, 整个计算系统用于求解运算的时间越来越少, 而数据准备和运算结果的表现问题却日益突出. 目前, 几乎所有的商业化数值模拟程序系统都有功能很强的前置建模和后置数据处理模块. 在强调 "可视化" 的今天, 很多程序都建立了对用户非常友好的 GUI (图形用户界面——Graphics User Interface), 使用户以可视图形方式直观快速地进行数据处理, 并按要求将计算结果整理成变形图、等值分布图, 便于极值搜索和所需数据的列表输出. 因此, 前后处理功能的提高仍将是今后若干年内专业化软件开发的主攻方向之一.

1.2.4 智能化的专家系统

近 10 年来, 计算机被广泛应用于工程地质研究, 加快了工程地质问题定量研究的步伐. 与此同时, 也出现了一种倾向, 即认为先进的计算方法与计算手段必然获得可靠的计算结果. 其实, 无论计算方法与计算手段多么先进, 计算结果的可靠性最终仍然取决于人, 取决于对工程地质条件的正确理解与概化. 因此, 基础地质调查, 工程地质条件研究, 工程地质问题的定性分析, 并不因为先进计

算方法与手段的出现而失去其重要性. 事实上, 往往是数值模拟的结果提供定量数据, 由于地质条件的变异性和随机性, 判定仍采用定性分析的形式. 由此, 目前数值分析需要更加智能化的专家系统作为决断的依据.

总之, 数值分析法将会广泛、有效地应用到工程地质领域中, 有助于人们客观、高效分析和解决工程地质问题.

参 考 文 献

[1] 黄云飞, 冯静. 计算工程地质学. 北京: 兵器工业出版社, 1992

[2] 王勖成, 邵敏. 有限元法基本原理和数值方法. 北京: 清华大学出版社, 1995

[3] 龚晓南. 土工计算机分析. 北京: 中国建筑工业出版社, 2000

[4] 徐建平, 胡厚田. 摄动随机有限元法在顺层岩质边坡可靠性分析中的应用. 岩土工程学报, 1999, 21(1): 71~ 76

[5] 王泳嘉, 宋文洲. 关于岩石力学有限元程序的若干思考. 岩石力学与工程学报, 1998, 11(17 增): 940~ 947

[6] Cundall P A. Explicit Finite Difference Methods in Geomechanics, in Numerical Meth-odsin Engineering (Proceedings of the EF Conference on Numerical Methods in Geomechanics), Blacksburg, Virginia, 1976, 1, 132~ 150

[7] Cundall P A. Adaptive Density-Scaling for Time-Explicit Calculations. Proceedings of the 4th International Conference on Numerical Methods in Geomechanics, 1982, 23~ 26

[8] Cundall P A. Distinct Element Models of Rock and Soil Structure. Analytical and Computational Methods in Engineering Rock Mechanics, Chapter 4, 1987, 129~ 136

[9] Theis C V. The Relation Between the Lowering of the Piezometric Surface and the Rate and Duration of Discharge of a Well Using Groundwater Storage. Trans. Am. Geophys. Union. 1935, 10, 519~ 524

[10] Biot M A. General Solutions of the Equations of Elasticity and Consolidation for a Porous Material. J. Appl. Mech., Trans. ASME 78, 1956, 91~ 96

[11] 王泳嘉, 邢纪波. 离散元法及其在岩土力学中的应用. 沈阳: 东北大学出版社, 1991

[12] Bandis S C, Lumsden A C and Barton N R. Fundamentals of Rock Joint Deformation. Int. J. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech. Abstr., 1983, 20(6), 249~ 268

[13] Bieniawski Z T. Determining Rock Mass Deformability: Experience from Case Histories. Int. J. Rock Mech. Min. Sci., 1978, 15, 237~ 247

[14] Cundall P A. Numerical Experiments on Localization in Frictional Material. Ingenieur-Archiv, 1988, 59, 148~ 159

[15] Cundall P A. Numerical Modelling of Jointed and Faulted Rock. Mechanics of Jointed and Faulted Rock, 1990, 11~ 18

[16] 石根华. 块体系统不连续变形数值分析新方法. 北京: 科学出版社, 1993

[17] 周维垣, 杨若琼, 剡公瑞. 流形元法及其在工程中的应用. 岩石力学与工程学报, 1996, 15(3): 211~ 218

[18] 王芝银, 王思敬, 杨志法. 岩石大变形分析的流形方法. 岩石力学与工程学报, 1997, 16(5): 399~ 404

[19] 朱以文, 曾又林, 陈明祥. 岩石大变形分析的增量流形方法. 岩石力学与工程学报, 1999, 18(1): 1~5

[20] 蔡美峰, 何满潮, 刘东燕. 岩石力学与工程. 北京: 科学出版社, 2002

[21] 杨志法, 王思敬, 冯子良等. 岩土工程反分析原理及应用. 北京: 地震出版社, 2002

第二章　工程地质问题及数值分析方法

2.1　工程地质问题

工程地质学是研究与人类工程建筑活动有关的地质问题的学科，是地质学的一个分支．工程地质学的主要目的是查明建设地区或建筑场地的地质条件，分析、预测和评价可能存在和发生的工程地质问题及其对建筑物和地质环境的影响和危害，提出防治不良地质现象的措施，为保证工程建设的合理规划，建筑物的正确设计、顺利施工和正常使用提供可靠的地质科学依据．

工程地质学研究的直接对象就是工程地质体．地质体是指在漫长的地质历史时期中经过各种改造和建造的结构体、结构面及其空间组合体．工程地质体是指在受工程作用力扰动影响范围内的地质体及其所在或邻接的地质环境载体．

工程地质学的主要研究方法包括地质学方法、实验和测试方法、计算方法和模拟方法．其中，模拟方法，可分为物理模拟（也称工程地质力学模拟）和数值模拟，它们是在通过地质研究，深入认识地质原型，查明各种边界条件，以及通过实验研究获得有关参数的基础上，结合建筑物的实际作用，正确地抽象出工程地质模型，利用相似材料或各种数学方法，再现和预测地质作用的发生和发展过程．近年来，数值分析已经成为解决工程地质问题的重要手段．

工程地质学作为一门应用性很强的学科，现代工业和社会的各类工程活动无不与工程地质体紧密相关，如工业与民用建筑、水利水电工程、道路桥梁工程、矿山开采工程、各类地下工程和国防工程等．这些工程活动或者是对工程地质体的利用、改造和治理为工程建设服务，如工业与民用建筑、道路桥梁工程、边坡工程等；或者是直接在工程地质体中进行开挖、支护，形成一定的服务空间，如矿山开采工程、地铁隧道工程、国防工程等．工程建筑活动所遇到的工程问题多种多样，主要包括：区域稳定性问题、地基稳定性问题、边坡稳定性问题、硐室稳定性问题，以及风化、河流地质作用等．

2.1.1　区域稳定性问题

在广大区域内出现的地层或地面稳定性问题，称为区域稳定性问题．它主要包括：地震、活断裂、水库诱发地震、砂土液化、地裂缝等．

区域稳定性问题对工程建设影响巨大，几乎在所有类型的工程建设中都涉及

此类问题，如水利水电工程，核电站工程，道路（公路、铁路）工程，采矿工程，工业与民用建筑工程，城市地下工程，长距离输水、输电、输气工程等.

例如，冯希杰等在区内地壳断块结构、圈层构造和地壳活动性研究的基础上，建立了长江三峡工程及其外围地区的立体地质模型. 采用 GTSTRUDL 结构分析计算机辅助工程软件系统，选用在张和压作用下都能较好地识别岩石破坏条件的莫尔–库仑准则，对长江三峡工程及其外围地区深部地质体的稳定性进行了分析和评价，获得深部地质体的破坏地点（不稳定地区）的分布. 通过改变破坏区地质体的弹性性质，模拟了地质体破坏时所释放的能量.

在地震工程方面，数值模拟是揭示地震作用规律的重要手段，如陈祖安等针对 1966 年以来华北地区一系列七级大震破裂过程，采用非连续变形分析方法(DDA + FEM)，进行了数值模拟. 在华北地区各地块相互制约的块体系统环境中，地块边界断层上发生 1966 年邢台地震、1969 年渤海地震、1975 年海城地震、1976 年唐山地震等不同类型破裂模式大震的破裂过程，数值模拟结果给出每个大震释放的主应力场，最大剪应力变化等值线图，地震前后位移变化矢量图，发震断层滑移随时间变化以及走滑错距和应力降震源参数等，显示了数值模拟的巨大作用.

2.1.2 边坡稳定性问题

边坡稳定性问题是最突出的工程地质问题之一. 进入 21 世纪，随着我国经济建设的快速发展，一些大型工程不断开工建设，在水利水电、矿山采掘、道路与水运交通、城镇建设、国防工程等各类领域都出现了大型边坡工程，由此引发众多的边坡稳定性问题. 近年来，无论在崩滑灾害的规律性分析、边坡的变形破坏机制的研究方面，还是边坡稳定性评价和崩滑灾害的预测预报方面，均取得了令人瞩目的成果，已初步形成独立的学科体系. 这一体系应包括四大部分：

(1) 崩滑灾害的区域分布规律性研究；

(2) 边坡的变形破坏机制研究；

(3) 边坡的稳定性评价和崩滑灾害预测预报；

(4) 边坡工程治理与崩滑灾害防治.

其中，边坡的变形破坏机制研究多使用数值模拟手段，来揭示边坡的变形破坏过程，并为边坡的整治方案提供可靠依据.

边坡分为天然边坡和人工边坡，在形成过程中，岩土体内的原有应力状态将随之发生变化，引起应力的重分布和应力集中等效应. 边坡岩土体为了适应这种新的应力状态，将发生不同形式和不同规模的变形与破坏. 一般地，边坡最终破坏形式主要为：崩塌、滑坡. 边坡稳定性的研究目的主要是对边坡的稳定性作出

评价和预测，揭示边坡变形破坏的演化规律，制定有效的整治措施，提出合理的设计方案.

边坡稳定性问题的数值分析重点揭示在不同的边界条件下边坡的位移场、应力场、渗流场和塑性区，或模拟其破坏过程，有些数值分析结合极限平衡理论也给出了边坡的稳定系数. 国内外已经研制出一些功能较强的分析软件，如Geo-slope、ANSYS、FLAC、2D-σ、3D-σ、RFPA、FINAL，以及2D-BLOCK、UDEC等软件. 其中，Geo-slope、ANSYS等基于有限元法的模块，可十分方便地模拟边坡的应力场、位移场和塑性区等，Geo-slope还可模拟边坡的渗流场. 2D-BLOCK、UDEC等基于离散元的计算软件可直观地仿真边坡的破坏过程.

2.1.3　硐室稳定性问题

工程建设中，在地层之内的中空通道或中空硐室统称为地下硐室. 如铁路公路隧道、地铁、矿山坑道、水工隧硐、地下商场、地下发电厂房、地下停车场、地下弹道导弹发射井等. 有些硐室的稳定性除受工程地质条件的制约外，还受到上部结构物、工程荷载等因素的影响，其稳定性分析更为复杂和深入，数值模拟充当了重要角色.

在岩土体内开挖地下硐室，由于破坏了岩土体原有的应力平衡状态，硐室周围岩土体中的应力大小与主应力方向发生改变，并不断调整，直至达到新的平衡状态. 对于地下岩石硐室，开挖使围岩的性状发生变化，主要因素为卸载回弹、应力重分布、水分的重分布. 一般说来，硐室开挖后，如果围岩岩体承受不了回弹应力或重分布的应力的作用，围岩即将发生塑性变形或破坏. 这种变形或破坏通常是从硐室周边，特别是那些最大压或拉应力集中的部位开始，而后逐步向围岩内部发展的，其结果常在硐室周围形成松动带或松动圈. 而上述的硐室变形破坏规律的揭示通常采用数值模拟手段来实现.

影响因素的分析是硐室稳定性分析的重要内容，如地震、工程振动荷载、渗流的作用，以及开采方式、开采深度等. 对于城市地下铁道和水工隧道、公路铁路隧道等，十分重视地震和工程振动的影响，如许增会等利用ANSYS软件的谱分析，研究了地震对隧道围岩稳定性的影响规律，得出在不同岩性、跨度、地震波的类型情况下地震作用对隧道围岩产生拉应力和位移的特征. 指出围岩的位移差异是破坏衬砌的主要原因，提出隧道支护应注意的问题，定量解释了大量调查资料中地震破坏隧道现象的成因. 对于采掘业的巷道或采场，研究了巷道的支护方法、采区的开采方式、采掘深度等因素的影响. 如运输巷道的优化设计、房柱式开采引发的地表沉陷、放顶煤开采引发的地表沉陷等.

2.1.4 建筑地基稳定问题

工程建设中与地基稳定性相关的工程地质问题主要包括建筑地基的沉降与强度、城市地面沉降、岩溶塌陷和采空区塌陷等问题. 在上部结构作用下，保持地基稳定一般是指：

(1) 保证地基受载后不会使地基发生破坏而丧失稳定；

(2) 地基变形不超过建（构）筑物对地基要求的允许变形值.

目前，在建筑地基稳定性问题方面的数值模拟课题十分广泛，一些方法也比较成熟. 主要解决的问题包括以下几方面：

(1) 建筑地基的压缩沉降计算；

(2) 不同上部结构和基础形式条件下，建筑地基的破坏机理分析；

(3) 上部结构、基础与地基的协同计算；

(4) 由于大量抽吸地下水，引发的地面沉降机理分析；

(5) 岩溶形成机理与塌陷分析；

(6) 地下采空引发的地表移动规律分析.

另外，结合地震工程和基础工程，土和结构动力相互作用是一个广泛受到关注的研究课题，它的研究对象涉及高层建筑、大型桥涵、地下工程、核电站、高水坝等与地基相连及在动力荷载作用下与地基有相互作用影响的各种结构体系.

2.2 工程地质体结构类型与数值分析方法

工程地质数值分析，首先应对工程地质体的岩性、结构和赋存环境进行地质信息分析，在此基础上，调查岩土体结构类型，将地质信息抽象为地质模型，然后考虑工程地质体的变形破坏规律，构建力学模型，研究材料本构关系和力学性质，将力学模型转化为数学模型[3].

由于岩土体的非连续性、非均质性、各向异性和赋存环境的复杂性，不同地区、不同建筑场地，其岩土体结构类型各不相同，而确定工程地质体的岩土结构类型是正确选择数值方法的基本保障. 因此，工程地质数值分析的重要工作之一就是科学地划分和确定岩土体结构类型.

根据工程地质体的完整程度、结构面特征，将工程地质体分为五类岩土体结构类型，即完整结构、块状结构、层状结构、碎裂结构和散体结构. 岩土体结构类型、划分依据、力学作用控制因素、破坏机制及其工程地质力学模型和对应的数值分析方法如表 2–1 所示.

表 2-1　工程地质体的岩体结构类型与数值分析方法对应表[3]

序号	结构类型	划分依据	力学作用控制因素	破坏机制	工程地质力学模型	数值分析方法
1	完整结构	坚硬结构面不连续切割或断续分布	岩性岩相及结构面切割程度	张破坏 剪破坏	连续介质模型	有限元法 有限差分法
2	块状结构	软弱结构面切割，块状结构体	软弱结构面	结构体滑移或夹层挤出	离散介质模型	离散元法
3	层状结构	软弱结构面切割，板状或组合板状结构体	软弱结构面及板状结构体	倾倒溃屈	考虑不连续单元的连续介质模型或离散介质模型	有限差分法 有限元法 离散元法
4	碎裂结构	坚硬结构面切割，块状结构体	结构面组数、密度、产状	结构体破坏 结构面错动 结构体滚动	离散介质模型	离散元法
5	散体结构	松散状岩块或土体	密实度、结构面组数	剪破坏	连续介质模型 离散介质模型	有限差分法 有限元法 离散元法

2.3　工程地质数值分析的关键问题

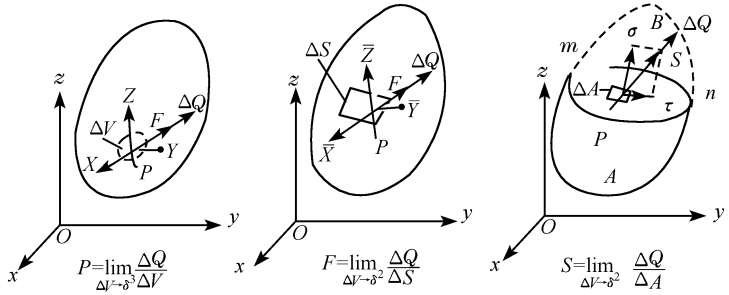
2.3.1　工程地质体的连续性问题[4]

工程地质体是一种高度非线性不连续介质，但迄今为止，人们在研究工程地质体的力学行为时沿用的力学理论仍是连续介质力学理论．因此，现今很多已发表的岩体力学研究文献都属于用连续介质力学理论来分析人们普遍认为是高度非线性不连续介质的岩体力学问题，这确为当前日益复杂的工程实践中存在的重要问题之一．

变形体力学理论（连续体理论）都遵循一个基本假定，即物体是连续的，也就是假定整个物体的体积都被组成这个物体的物质微元连续分布占据．在此前提下，物体运动的一些物理量，如应力、形变、位移等才可能是连续变化的，才能用坐标的连续函数来表示它们的变化规律．例如，与应力有关的几个基本量即体力 P、面力 F 和应力 S 才能用极限的数学方式定义（图 2-1）．

上述定义的极限情况实际上是不存在的．因为岩石到晶粒尺寸范围，已出现不连续性．而趋于比晶粒或分子间距小的某一值，连续性假设的合理性就需要重新讨论．

这就表明，在应用工程力学领域，原封不动地借用经典理论力学的连续性假设和定义就会出现理解上的问题．其原因是，理论上的应力是某点的应力，物质世界的应力都是某一微元的平均应力，且工程地质体本身包含有许多微裂隙、空



(a) 体力　　(b) 面力　　(c) 应力

图 2–1　变形体力学的几个物理量图示

穴、节理，材料组织具有非均匀非连续性．因此，在应用中必须考虑工程地质体连续性假设的合理使用范围和各物理量的适用定义．

1. 连续性假设和物理量数学表达

物体连续性假设：假定整个物体的体积都被组成这个物体的物质微元所充满，没有任何空隙．同理论抽象的数学点不同，物质微元是有大小的．物质微元的尺寸决定于所研究的工程地质体的尺寸．只有满足物质微元的临界尺寸，才能保证工程地质体的连续性．物质微元的临界尺寸是指能保证工程地质体抽象为连续体的物质微元的最小尺寸．满足这一条件的物质微元的临界尺寸，也称为拟连续微元尺寸，简称连续微元尺寸．

假定连续微元尺寸为：一维连续微元尺寸为 δ，二维连续微元尺寸为 δ^2，三维连续微元尺寸为 δ^3，则满足前述连续性假设条件的物体中的物理量的数学表达举例如下：

$$\text{体力}\quad P=\lim_{\Delta V\to\delta^3}\frac{\Delta Q}{\Delta V} \tag{2–1}$$

$$\text{面力}\quad F=\lim_{\Delta V\to\delta^2}\frac{\Delta Q}{\Delta S} \tag{2–2}$$

$$\text{应力}\quad S=\lim_{\Delta V\to\delta^2}\frac{\Delta Q}{\Delta A} \tag{2–3}$$

2. 连续性模型和连续微元尺寸条件

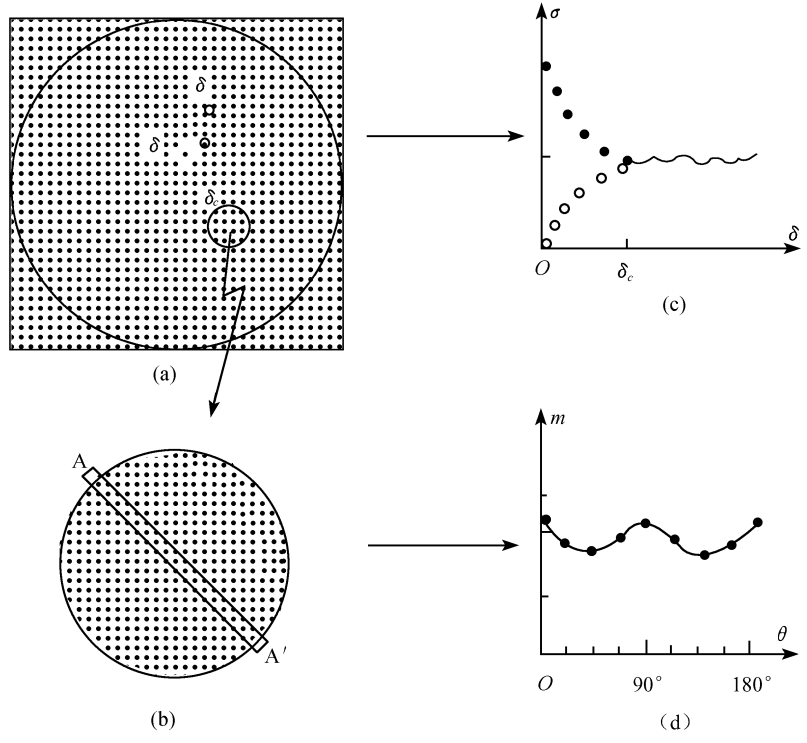
连续性模型如图 2–2 所示，连续性模型表示工程物体只有含充分多的一定尺寸的微元才能抽象为连续体．组成连续体的连续微元尺寸应满足三个条件：

(1) 连续微元尺寸与所研究的对象——工程地质体相比要足够的小，使之在数学处理时可以近似作为数学点看待，能保证各物理量从一微元到另一微元连续

变化，避免把物质的非均质性平均化，如图 2-2（a）、（c）所示.

（2）连续微元与其所含的空隙、颗粒尺寸相比足够的大，包含了足够数量的空隙和颗粒，以保证每个单元截面上的物理量均值连续变化，便于取各物理量的统计平均值作为单个微元的物理量，如图 2-2（b）、（d）所示.

（3）在满足（1）和（2）的条件下，取最小的临界尺寸 δ 作为连续微元尺寸，如图 2-2（c）所示.



（a）工程地质体；（b）连续性微元；（c）不同尺寸微元的物理量变化及连续微元尺寸 δ_e；（d）连续微元各截面的物理量连续变化. σ——某一物理量（如应力等）；δ——微元尺寸；δ_e——连续微元尺寸；m——剖面 A-A′ 含颗粒数；θ——剖面 A-A′ 与水平线夹角.

图 2-2　连续性模型及连续微元尺寸

显然，由满足上述条件的连续微元所组成的工程地质体，都可近似抽象为连续体，均可做数学和力学运算处理.

又由于在做介质的连续性工程概化处理时必须有量的界限，建议符合条件（1）的是工程物体二维尺寸，它必须是微元二维尺寸的 10^4 倍以上；符合条件（2）的是微元一维尺寸，它是微粒直径的 10 倍以上. 符合条件（1）、（2）者，取微元尺寸最小值 δ，定义为连续微元尺寸.

3. 拟连续微元尺寸

从连续微元尺寸的条件可知，对不同尺寸和不同结构的工程地质体，其连续微元尺寸有所不同. 为此，特从不同尺度的研究对象出发，把连续微元划分为三类，即微观力学中的连续微元、细观力学中的连续微元和宏观力学中的连续微元.

研究的对象不同，其相应的连续微元尺寸也不同. 在微观力学领域，所研究的物体是分子的尺度，因而微观连续微元尺寸应是原子的尺度，后者和前者相比足够的小，同时，微观连续微元又要包含足够多的原子. J. Gramburg 在研究微观应力时，建议应力微元尺寸 δ 应是原子直径的 5~ 10 倍. 其原因是，这样能保证微元内各截面的物理量值不发生突变. 原子的尺寸按 3×10^{-7} mm 计，则微观连续微元尺寸 δ 应为 3×10^{-6} mm 左右.

在细观力学领域，所研究的对象是晶粒集合体的尺度，晶粒晶面发育不同、成分不同、粒间缝隙不同等都会对颗粒集合体内部的粒间作用力产生较大影响，其相应的细观连续微元尺寸选作颗粒直径的 10 倍. 颗粒直径范围一般在 0. 1~ 50mm，而细观连续微元尺寸 δ 在 1. 0~ 500mm 范围.

在宏观力学领域，所研究的工程地质体规模巨大，如边坡岩体工程、硐室岩体工程、地基岩体工程和区域地壳稳定工程等，其二维断面为 $10^4 \sim 10^8$ m^2. 要研究如此大范围的应力场变化，其连续微元尺寸 δ 可以是 $10\sim 10^2$ mm 左右. 后者和前者相比足够的小，保证了工程岩体中包含了足够多的连续微元. 同时，后者与包含其中的岩块、结构面相比又足够的大，使之又包含了足够多的岩块和裂隙，便于求出微元的平均物理量.

从上述分析可知，物体的连续性实际上是一种模型，是一个相对概念. 不同的尺度，其连续性内涵不尽相同. 在宏观领域内，不能用细观或微观的连续性内涵去理解，反之亦然，否则，就很难体会出连续性概念的真谛，从而也不能正确地理解和应用. 另一方面，尽管在不同尺度范围连续性内涵不同，但都可能同时满足连续微元条件，都可以用连续性模型来描述，从而可以用连续体力学理论去分析.

连续性概念和模型建立之后，要进行工程地质体的连续体力学计算分析，首先要根据各种岩体的具体情况，进行连续性和不连续性的概化处理. 一般来说，人类所从事的各种地质工程，诸如巷道工程、边坡工程等，研究对象的范围一般都比较大. 过去对如此大范围的工程地质体的连续性问题产生怀疑，这是因为不合理地用细观力学和微观力学的连续性内涵来理解其连续性. 例如，某工程地质体的二维计算剖面约为 1.5×10^6 m^2，如果一味地用细观力学和微观力学的连续性内涵进行理解，必然导致对其连续性的怀疑. 因此，对于如此大范围的工程地

质体的连续性，应该用宏观连续微元的内涵来理解.

2.3.2　工程地质体的大变形问题[4]

一般条件下材料可能处于线弹性、非线性弹性、塑性、黏性流动等应力应变状态. 在弹性阶段材料一般是小变形. 但是，对于高地应力状态下的工程地质体而言，经常处于塑性或黏性流动应力应变状态，在该状态下工程地质体的变形不再是符合变形叠加的小变形，而是进入非线性的大变形状态.

现有的数值分析方法和软件绝大多数是依据符合叠加原理的小变形理论而建立和编写的. 非线性大变形是工程地质体变形的重要特征. 所以，认识工程地质体的变形特性，用大变形理论分析、计算工程体的变形，采用非线性大变形理论进行工程地质体稳定性控制设计是十分必要的，也是工程地质体数值分析的一个重要发展方向.

1. 小变形理论应用于大变形问题的缺陷

准确的数值算法必须同时考虑几何非线性和材料非线性[3]. 工程地质体至今所沿用的连续性力学理论虽然考虑了材料的物理非线性问题，但从几何理论角度看，仍然为小变形近似理论[4]. 而小变形理论应用于大变形问题则存在一定的不适应性，存在的主要问题有：

(1) 小变形理论计算大变形问题时产生不应有的误差；

(2) 小变形理论应用于大变形问题时违反能量守恒定律.

2. 非线性大变形力学理论

非线性大变形力学理论特点是采用两套参考系 X^i，固定坐标系 X^i 和拖带坐标系 x^i (图 2-3).

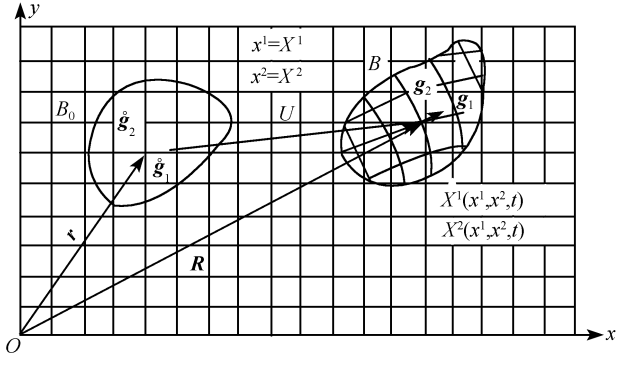


图 2-3　拖带坐标系

设一连续体 B_0，在时间过程中进行连续变换，$B_0(t_0)\rightarrow B(t)$. 在时刻 t_0，嵌含在形变体中的拖带系 x^i 和标准固定正交系同胚，即

$$X^i = X^i(x^i, t_0) = x^i$$

在 t 时刻

$$X^i = X^i(x^i, t)$$

定义变形体内任一点的基标矢量为

$$\mathring{\boldsymbol{g}}_i = \frac{\partial \boldsymbol{r}}{\partial x^i} = \lim_{\Delta x^i \to 0} \frac{\Delta \boldsymbol{r}}{\Delta x^i} \tag{2-4}$$

基标矢量的几何意义是沿拖带坐标线的切矢量（图 2-3）.

变形体在外在因素作用下发生运动变形，$\boldsymbol{r}\rightarrow\boldsymbol{R}$，基标矢量变换为

$$\boldsymbol{g}_i = \frac{\partial \boldsymbol{R}}{\partial x^i} = \lim_{\Delta x^i \to 0} \frac{\Delta \boldsymbol{R}}{\Delta x^i} \tag{2-5}$$

$\boldsymbol{r}$、$\boldsymbol{R}$ 是变形体中一点在 t_0 和 t 时刻的位移矢量.

为了对大变形特性进行准确的力学描述，就要用非线性大变形连续体力学理论. 极分解定理与和分解定理可以很好地描述大变形问题.

2.3.3 数值分析方法的定性与定量问题

工程地质体的本构关系是指工程地质体的应力和应变关系，它表达的是工程地质体在外力作用下抵抗变形的物理性能，因此又称为物理关系或者物理方程. 目前，岩体工程尚不能很好地定量分析的重要原因之一，是岩体的物性关系难以准确合理地确定. 由于岩体结构的复杂性，要用完全准确的数学方法描述其物性系数因地而异的变化情况，事实上是办不到的. 工程岩体计算参数的准确选取一直是岩土力学研究的难题，至今尚未解决. 正是由于地质工程中仍存在着许多未知、不确定、模糊的因素，致使目前的各种岩土工程数值分析，在大多数情况下只能给出定性的分析结论，而难以准确进行定量的工程设计.

国际岩土工程领域广泛应用的 FLAC 程序[5]，曾在其界面上标记 Hamming 说过的一句话："The purpose of computing is insight, not numbers." 诚然，定性反映工程地质问题规律性的数值分析，有助于现场工程地质人员加深对工程受力状况及变化情况的理解，从而能够依此改进工程设计，正确决策施工方案；另一方面，数值模拟能够对动态施工过程中各影响因素进行参数敏感性分析，能够考虑各种因素进行多方案优化分析，给出可视化的多媒体输出结果与效果，还可以随时改变边界条件，进行多次重复的试验，可保存中间计算结果. 因此，工程地质数值分析，是一种省时、经济、可信度高的室内试验方法.

2.3.4 数值分析方法的必要性和重要性

工程地质的研究对象，往往是大尺度范围下的工程岩体，在漫长的地质历史

过程中，经历了多次地质构造应力场的作用，节理、裂隙渐趋发育，岩体损伤程度愈趋加强，使原始状态比较完整的岩体变成含有很多裂隙的岩体，造成了工程岩体材料的非均质、非连续和各向异性.

地质历史上的每一次构造运动，相当于在巨大地壳岩体上进行加载，而在两次构造运动之间的相对平静期，相当于给岩体卸载. 这样周而复始，给岩体加载、卸载、又加载、又卸载，直到现在. 因此，漫长的地质构造史，相当于岩体间歇性加载、卸载史. 在加卸载条件下，工程岩体的力学响应特性表现出与应力路径、应力状态及加卸载的时间、空间状态变化密切相关的特点. 针对这样一种动态、复杂多变的工程岩体，仅用解析方法求解是困难的. 工程地质问题的复杂性，决定了采用数值模拟方法的必要性和重要性[6].

2.4　工程地质数值分析基本步序

随着计算机技术的迅猛发展和各种数值算法的不断完善，数值模拟技术成为有效解决工程地质复杂问题的重要手段. 目前，比较著名的国际性岩土工程软件主要有 FLAC^{2D}、FLAC^{3D}、UDEC^{2D}、3UDE、PFC^{2D}、PFC^{3D}、2D-σ、3D-σ、DDA 等，它们已被广泛地应用于煤炭、水工、铁道、国防等工程地质领域，取得了良好效果. 实践证明，每一种软件都不是万能的，都要根据具体的工程地质问题选择使用.

尽管在工程地质领域应用的各类数值分析方法多种多样，但进行数值分析的方法与步序基本一致，现简介如下[7].

2.4.1　明确研究目的

计算模型的复杂程度（网格的疏密、材料性质与本构模型）取决于研究目的. 例如，如果研究目的是探讨系统中两个子系统互相冲突的作用机理与决策，则构建一个能够模拟这两种机理的较粗略模型；如果由于个别因素的存在，导致这种冲突的作用放大，才有必要在模型中考虑个别因素. 如果影响较小，或者对所研究的目的不相关，模型中应当忽略不计.

2.4.2　工程地质条件的综合分析

工程地质条件是指在工程建设中，对工程建筑的利用和改造有影响的地质因素的总称. 在数值模拟之前，必须对研究对象进行详细的工程地质调查，掌握建筑场地的工程地质条件. 任何不重视工程地质条件，过分对模型理想化的做法，其计算结果必然是垃圾，毫无价值可言.

工程地质条件主要包括：

(1) 地形地貌：如边坡工程的高度、坡度（坡角）、形状等；

(2) 地层岩性：土质、岩质（岩浆岩、变质岩、沉积岩）等，决定地质体的变形破坏特征；

(3) 地质构造与岩体结构：岩土体的层面、节理、断层、片理等软弱面分布，与斜坡坡面倾向关系，与硐轴线的关系等；

(4) 地下水条件：地下水的补给、径流、排泄，地下水埋深、静水压力、动水压力的作用等；

(5) 地应力条件：地应力类型、大小、方位；

(6) 地震作用：地震烈度、地震动参数.

2.4.3 工程地质模型建立

研究区的大量工程地质勘察资料是离散性的，应根据数值模拟的需要，有针对性地确定工程地质模型. 主要包括工程地质体计算范围、工程地质体属性分区、岩土体结构确定、地下水特征、地应力与地震作用等.

1. 工程地质体计算范围

工程地质模型的建立，首先要确定工程地质体的计算范围，它主要取决于工程地质体的工程作用范围，如边坡工程、地下工程应考虑工程改造条件下岩土体内应力重分布的影响范围. 同时还要考虑选用的计算软件对于计算单元的要求，以及人们对计算速度的忍耐程度.

2. 工程地质体属性分区与参数确定

工程地质体属性分区以地层岩性为主要依据，不同的地层岩性划分为不同的属性分区，同时还要考虑断裂带、风化带等物理力学性质出现较大差异时的影响. 当存在明显的结构面时，应在模型中考虑它的作用.

3. 岩土体结构类型确定

工程地质体的岩土体结构类型分为五类，即完整结构、块状结构、层状结构、碎裂结构和散体结构. 根据工程地质条件和勘察测试的结果，综合确定所研究的工程地质体的岩土结构类型，从而确定工程地质体是连续介质还是离散介质，以便选取合理的计算软件.

4. 地下水特征

地下水是工程地质体变形破坏的重要影响因素，特别是水利水电的岸坡工

程、软土地区的地基基础工程的模拟，在工程地质数值模拟中必须考虑它的作用．首先，分析工程地质体的地下水力学作用方式，是静水压力还是动水压力，分析地下水在岩土体中渗流规律，掌握地下水的作用范围．其次，综合分析地下水对岩土体的软化作用及其参数变化规律．最后，要正确地将地下水的软化作用、水力学作用加到计算模型中．

5. 地应力与地震作用特征

地应力包括自重应力和构造应力，在工程地质模型中通常施加岩土体的自重应力作用．但在高地应力地区，往往要充分考虑构造应力的影响．工程实践表明，水平构造应力的作用十分显著，在工程地质模型中应充分研究水平构造应力随深度的分布规律，并施加于计算模型中．

地震作用往往是工程地质体变形破坏的诱发因素，在我国基本烈度Ⅶ度以上地区或重大工程建设中，均需考虑地震的影响．数值计算中，为了便于使用，通常将地震力作为准静态力施加于计算模型中．另外，为精确获得岩土体对地震的响应规律，还可以输入一个地震波谱，来模拟工程地质体及其相连构筑物的变形破坏规律．

2.4.4　计算模型建立与边界条件分析

对具体工程地质问题，构建模型前对计算模型可能显现的某些特性有一定的估计，对计算者来说是相当重要的．例如，预测系统是否会出现不稳定状态？主要力学响应是线性还是非线性？研究对象是大变形还是小变形？材料特性在本质上能否处理为连续介质？是否关心地下水的影响？选取的模型边界是否合理？是进行三维分析还是二维分析？

1. 调试简单模型

在正式分析前，先构建一个简单等效模型进行计算，尽可能地获得对系统机理理解的信息，有助于进一步提高计算模型的构思；在投入精力从事有意义的分析之前，检查简单等效模型构思潜在的缺陷，进行参数调试，边界条件是否合理？所选的材料模型能否合理描述材料特性等？

2. 构建理想模型

构建计算模型所需要的主要数据：

(1) 几何参数（边坡或地下硐室的几何尺寸、岩土体结构及组合关系、地表形态等)；

(2) 地质构造 (断层、褶皱、优势节理及组合关系等);

(3) 材料特性 (弹性/塑性、峰后特性等);

(4) 初始条件 (原岩应力、地下水位、饱和状态等);

(5) 荷载情况 (地震荷载、爆破荷载、支护加固荷载等);

(6) 调试模型 (考虑计算时间、历史值记录、保存中间计算结果).

计算者详细了解研究对象所处的地质环境、工程背景、室内外试验结果等,从而对工程中可能存在的问题作出准确地判断. 在此基础上,构建合理的计算模型,确定适用的本构模型和相应的计算参数,才有可能合理、准确地进行工程地质问题数值分析.

2.4.5 计算与分析

一般地,同一计算问题,不同的计算者可能得到相去甚远的计算结果. 因此,获取合理、可信的计算结果不仅是一个计算问题,更需要计算者具备一定的工程经验储备.

由于工程地质所固有的不确定性,数值分析结果的可靠性往往取决于分析者对所研究问题的认识程度与工程经验. 对于计算者,不仅需要深入工程现场,不断积累工程经验,更重要的是分析者在计算前,必须对研究的问题要有充分的了解,才可能选取合理的计算参数、确定相适应的边界条件以及设计可行的计算方案. 在此基础上,才能正确地分析和评价计算结果,并准确地应用于工程设计.

习题与思考题

1. 工程建设中存在的工程地质问题有哪些?

2. 结合某一工程实例,试述如何进行工程地质力学模型的概化及选择相应的数值分析方法?

3. 在进行工程地质数值分析时需明确哪些问题?

4. 简述工程地质数值分析的一般步骤.

参 考 文 献

[1] 张咸恭. 工程地质学 (上册). 北京: 地质出版社, 1979

[2] 谢和平, 彭苏萍, 何满潮. 深部开采基础理论与工程实践. 北京: 科学出版社, 2006

[3] 孙广忠. 孙广忠地质工程文选. 北京: 兵器工业出版社, 1997