

采矿工程问题 数值模拟研究与分析

谢文兵 陈晓祥 郑百生 著

中国矿业大学出版社

China University of Mining and Technology Press

采矿工程问题数值模拟 研究与分析

谢文兵 陈晓祥 郑百生 著

中国矿业大学出版社

图书在版编目(CIP)数据

采矿工程问题数值模拟研究与分析/谢文兵,陈晓祥,
郑百生著. —徐州:中国矿业大学出版社,2005.10
ISBN 7 - 81107 - 208 - 4

I. 采… II. ①谢…②陈…③郑… III. 矿山开采
—数值模拟 N. TD8

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2005)第 119046 号

书 名 采矿工程问题数值模拟研究与分析
著 者 谢文兵 陈晓祥 郑百生
责任编辑 何 戈
责任校对 杜锦芝
出版发行 中国矿业大学出版社
(江苏省徐州市中国矿业大学内 邮编 221008)
网 址 <http://www.cumtp.com> E-mail cumtpvip@cumtp.com
排 版 中国矿业大学出版社排版中心
印 刷 徐州中矿大印发科技有限公司
经 销 新华书店
开 本 787×960 1/16 印张 11.75 字数 230 千字
版次印次 2005 年 10 月第 1 版 2005 年 10 月第 1 次印刷
定 价 28.00 元

(图书出现印装质量问题,本社负责调换)

前 言

随着实测技术、非连续介质力学、大变形理论、物理模拟技术和计算机数值模拟的发展,人们可以从理论分析、现场实测、物理模拟和计算机模拟等不同侧面来研究采矿岩层控制中各种力学机理及围岩控制技术,特别是现代计算机技术的高速发展,数值模拟技术已成为研究采动覆岩活动规律及岩层控制技术的重要研究手段。

煤矿安全、高效、绿色开采技术的发展,需要解决一系列重大的技术难题,如充填开采技术、煤炭地下气化、煤与瓦斯共采技术、保水开采技术、深部开采的巷道围岩控制机理及控制技术、煤矿冲击地压、瓦斯突出、深部开采的地温地压以及煤柱的长期稳定性等一系列问题。这些技术难题的许多方面属前沿性的研究课题,在缺乏实验设备和现场试验监测结果的情况下,需要采用数值模拟方法进行理论性和前瞻性的研究。为了搭建这方面的研究平台,在“211”一期工程引进 Itasca 部分软件的基础上,又在“211”二期工程配套完善了 Itasca 软件。Itasca 软件是目前世界上公认较为优秀的岩土力学数值计算软件包之一,由美国国际著名 Itasca 岩土力学咨询公司针对岩土工程和采矿工程问题的特点开发,该软件特别适用于岩土工程和采矿工程中几何和物理高度非线性问题的稳定性分析。

与其他领域的岩土工程问题相比,采矿领域的岩土工程问题有其本身的特点。其最大特点是采矿领域的大部分围岩稳定性问题都涉及到开采引起的强烈影响,引起围岩应力重新分布带来的高应力作用以及围岩的大范围移动和严重破裂。80%以上煤矿巷道或硐室受到工作面开采的动压影响,其围岩的强烈变形与工作面开采引起的整体位移场和采动应力场的分布关系极为密切。另外,对一般的岩土工程问题,材料和结构破坏意味着报废,而在采矿工程中,工作面上覆岩层的损伤、断裂和失稳往往是不可避免的。研究采动覆岩的变形、运动与受力,更多的是材料或结构破坏后的力学行为以及结构破坏和失稳的全过程。

本书是作者近十年来在采矿工程问题数值模拟分析方面进行理论研究和实际应用的成果总结。全书共分 10 章,第一章简要叙述了数值模拟的发展及其研究现状,分析了岩土工程及采矿工程问题的特点及其数值模拟方法;第二章介绍了 Itasca 软件的特点及应用领域、Itasca 软件数值计算方法及岩土和采矿工程问题的数值模拟步骤;第三章在总结分析开采引起覆岩移动变形规律的基础上,研究了采矿工程问题数值模拟建模时模型边界位置合理确定的原理和方法,深入

分析了模型范围对模拟结果的影响;第四章进一步分析了模型边界条件对采矿工程问题模拟结果的影响;第五章简述了岩体力学特性及其参数的合理确定,并讨论了采动岩体的力学特性;第六章详细分析了软岩硐室支护围岩接触关系对支护体内力和围岩自承能力的影响、支护体的变形破坏特征以及锚注加固机理;第七章分析了近距离厚煤层跨采对底板巷道围岩稳定性的影响,并根据采动影响巷道的围岩移动变形特点提出相应的围岩控制技术措施;第八章针对综放沿空留巷的关键技术问题,详细分析了综放沿空留巷的围岩活动规律以及综放沿空留巷围岩稳定性的影响因素及其影响规律;第九章详细分析了锚杆支护参数对巷道围岩稳定性的影响;第十章采用三维数值模拟软件FLAC3D,分析了在不规则煤柱影响下,工作面开采过程中煤层的应力变化情况。

作者的研究工作是在我国著名矿山压力专家陆士良教授的指导下完成的,姜耀东教授给予了大量的帮助和指导。在课题的研究过程中,得到了枣庄矿务局柴里煤矿、付村煤业公司,潞安矿务局常村煤矿,淮北矿务局临涣煤矿、涡北煤矿,铜川矿务局下石节煤矿、陈家山煤矿、铜川矿务局建筑安装工程公司,郑州矿务局米村煤矿、裴沟煤矿等单位领导和工程技术人员的大力支持与协助。

由于本书撰写时间仓促,不当之处在所难免,恳切希望有关专家和读者批评指正。

作 者

2005年10月

目 录

第一章 绪论	1
第一节 数值模拟发展及其现状	1
第二节 岩土及采矿工程问题特点及数值模拟方法	8
第二章 Itasca 软件特点及数值模拟方法	17
第一节 Itasca 软件及其特点	17
第二节 Itasca 软件数值计算方法	27
第三节 岩土和采矿工程问题的数值模拟步骤	32
第三章 模型边界的合理确定	36
第一节 开采引起的覆岩移动变形规律	37
第二节 单个巷道的影响范围	46
第三节 采动影响下模型边界位置的合理确定方法	47
第四节 模型边界位置对模拟结果的影响分析	54
第四章 模型边界条件及初始应力场的合理确定	65
第一节 模型边界条件的类型及其选择	65
第二节 采动影响的模型边界条件	68
第三节 模型边界条件对模拟结果的影响分析	69
第四节 初始地应力场的确定	73
第五章 岩体力学特性及其参数确定	83
第一节 岩体的力学特性	83
第二节 岩石与岩体力学参数的关系	86
第三节 岩石(体)力学参数的合理确定	88
第六章 软岩硐室围岩作用关系分析	99
第一节 工程概况	99
第二节 硐室围岩间接触关系反分析	100

第三节	支护与围岩的相互作用关系分析·····	103
第四节	软岩巷道中锚杆支护失效的机理·····	109
第五节	锚注加固机理分析·····	112
第七章	近距离厚煤层跨采对底板巷道围岩稳定性影响分析·····	117
第一节	工程背景·····	117
第二节	分析模型·····	120
第三节	近距离跨采围岩应力演化及特点·····	121
第四节	跨采巷道围岩位移规律及特点·····	122
第五节	底板巷道围岩控制技术·····	128
第八章	综放沿空留巷围岩稳定性影响分析·····	136
第一节	工程背景及技术关键·····	136
第二节	分析模型·····	138
第三节	综放沿空留巷围岩活动规律·····	140
第四节	综放沿空留巷围岩稳定性影响分析·····	141
第五节	综放沿空留巷围岩控制技术分析·····	145
第九章	锚杆支护参数对巷道围岩稳定性影响分析·····	151
第一节	工程地质条件·····	151
第二节	数值力学分析模型·····	152
第三节	锚网支护参数影响规律分析·····	154
第四节	相邻巷道掘进对巷道围岩稳定性的影响·····	163
第十章	不规则煤柱下工作面开采的三维数值模拟·····	165
第一节	工程概况·····	165
第二节	建立分析模型·····	165
第三节	开采对围岩应力变化的影响分析·····	169
参考文献 ·····		177

第一章 绪 论

随着实测技术、非连续介质力学、大变形理论、物理模拟技术和计算机数值模拟的发展,使得人们可以从理论分析、现场实测、物理模拟和计算机模拟等不同侧面来研究采矿岩层控制中各种力学机理及围岩控制技术。然而现场实测需要大量人力、物力,而且耗时较长;物理模拟的结果虽然比较直观,但受模型尺寸、信息提取和处理技术以及成本和时间的制约,难于分析各个因素的影响规律,而且只能进行定性分析;现有的力学理论只能解决圆形或者椭圆形巷道或硐室等具有简单形体的问题,对于几何形状复杂的巷道或硐室则无能为力^[1]。这些问题在数值模拟中都能得到很好的解决。数值力学分析正是为了解决这些问题应运而生的,它不仅能模拟岩体的复杂力学和结构特性,也可很方便地分析各种边值问题和施工工艺过程对硐室或巷道围岩稳定性的影响,并对工程岩体稳定性进行预测和预报^[2]。如果能从宏观上把握岩体的力学特性,通过地应力测试把握地应力场,数值力学分析结果完全可以用于指导工程实践。正因为上述各个方面的原因,数值模拟技术得到了大力发展,已成为解决采矿工程和其他岩土工程问题的重要研究手段之一。

第一节 数值模拟发展及其现状

一、数值模拟方法的发展

近几十年来,随着计算机应用的发展,数值计算方法在岩土工程问题分析中迅速得到了广泛应用,大大推动了岩土力学的发展^[3]。在岩土力学中所用的数值方法主要有^[1]:有限差分法、有限元法、边界元法、加权余量法、半解析元法、刚体元法、非连续变形分析法、离散元法、无界元法和流形元方法等。

有限差分法比较古老,在计算机出现以前就有。它的基本思想是将待解决问题的基本方程和边界条件(一般为微分方程)近似地用差分代数方程来表示,即由有一定规则的空间离散点处的场变量(应力、位移)的代数表达式代替,从而把求解微分方程的问题转化为求解代数方程的问题。也就是说,它将实际的物理过程在时间和空间上离散化,分成有限数量的有限差分量,近似假设这些差分量足够小,以致在差分量的变化范围内物体的性能和物理过程都是均匀的,并且可以应用描述物理现象的定律,只不过在差分量之间发生阶跃式变化。其原理就是将

实际连续的物理过程离散化,近似地替换成一连串的阶跃过程,用函数在一些特定点的有限差商代替微商,建立与原微分方程相应的差分方程,从而将微分方程转化为一组代数方程^[4],且有限差分法通常采用“显式”时间步进方法解算代数方程。有限差分法原理简单,可以处理一些相当复杂的问题,应用范围很广。

20世纪50年代出现并得到广泛应用的有限元法,使经典力学解析方法难以解决的工程力学问题都可以用有限元方法求解。它是基于最小总势能变分原理,能方便地处理各种非线性问题,能灵活地模拟岩土工程中复杂的施工过程^[2],因而是目前工程技术领域中实用性最强、应用最为广泛的数值模拟方法^[3],它将连续的求解域离散为一组有限个单元的组合体,解析地模拟或逼近求解区域。由于单元能按各种不同的联结方式组合在一起,且单元本身又可有不同的几何形状,所以可以适应几何形状复杂的求解域。它的特点是利用每个单元内假设的近似函数来表示求解区域上待求的未知场函数,单元内的近似函数由未知场函数在各个单元节点上的数值以及插值函数表达。这就使未知场函数的节点值成为新未知量,把一个连续的无限自由度问题变成离散的有限自由度问题。只要解出节点未知量,便可以确定单元组合体上的场函数,随着单元数目的增加,近似解收敛于精确解。按所选未知量的类型,即是以节点位移作为基本未知量还是以节点力作为基本未知量、或二者皆有,有限元法可分为位移型、平衡型和混合型。由于位移型有限元法在计算机上更易实现,便于电算求解,且易推广到非线性和动力效应等其他方面,所以,位移型有限元法比其他类型的有限元法应用更为广泛。比较著名的通用有限元程序有SAP5、ADINA等^[2]。有限元法需形成总体刚度矩阵,常常需要巨大的存储容量,甚至大得无法计算。由于相邻界面上只能位移协调,对于奇异性问题(应力出现间断)的处理比较麻烦,这是有限单元法的不足之处。

边界元法^[2,13,14]是20世纪60年代发展起来的求解边值问题的一种数值方法。它是以拜特(Betti)互等定理为基础,有直接法与间接法两种。直接边界元法是以互等定理为基础建立起来的,而间接边界元法是以叠加原理为基础建立起来的。它把边值问题归结为求解边界积分方程问题,在边界上划分单元,求边界积分方程的数值解,进而求出区域内任意点的场变量,故又称为边界积分方程法。边界元法只需对边界离散和积分,与有限元法相比,具有降低维数(将三维降为二维、将二维降为一维)、输入数据较简单、计算工作量少、精度较高等优点。这一点在无限域或半无限域问题的求解中表现得尤为明显,尤其是对均质或等效均质围岩地下工程问题的分析更为方便。边界元法的基本解本身就有奇异性,可以比较方便地处理所谓奇异性问题,因此,边界元法得到人们的重视。目前还有一种方法将边界元法和有限元法进行耦合,以求更简便地解决一些复杂的岩土

工程问题。边界元法对于多种介质构成的计算区域,未知数将会有明显增加。当进行非线性或弹塑性分析时,为调整内部不平衡力,需在计算域内剖分单元,这时边界元法就不如有限元方法灵活自如。这是它的主要缺点。

加权余量法^[5]是一种求解微分方程的数值法,它在流体力学、热传导以及化学工程等方面应用较为广泛。它具有两个方面的优点:第一,由于加权余量法是直接从控制方程出发去求解问题,理论上简单易懂,不像变分法那样需要复杂的数学处理,又由于它的应用与问题的能量泛函是否存在无关,因而它的应用范围较广,利用这一特点去建立有限单元的刚度矩阵,大大扩大了有限单元法的应用范围;第二,加权余量法的计算程序十分简单,所需求解的代数方程组阶数较低,对计算机内存容量要求不高,计算所需要的原始数据较少,大大减轻了准备工作量。此外,加权余量法求得结果的同时,可以给出余量的大小,而余量的大小可以直接反映出解答的精确程度,这一优点可以说是较为独特的。

半解析元法^[1]是 Y. K. Cheung 于 1968 年提出来的,它同有限元法一样,也是基于变分原理的一种数值计算方法。不同点是半解析元法是根据结构的类型和特点,利用部分已有的解析结果,选择一定的位移函数,使解中沿某些方向直接引入已知解析函数系列,而不再离散为数值计算点,因此自由度和计算工作量大为降低。这几年来半解析法发展很快,种类很多,主要包括有限条法、有限层法、有限厚条法、有限壳条法、样条有限元法以及无限元法等。这类方法适用于求解高维、无限域及动力场问题。

无界元法^[1]是 P. Bettess(1977)为了解决用有限元法求解无限域问题时,人们常会遇到的“计算范围和边界条件不易确定”而提出的,它可以看成是有限元法的推广。其基本思想是适当地选取形函数和位移函数,使得当局部坐标趋近于 1 时,整体坐标趋于无穷大和位移为零,从而满足计算范围无限大和无限远处位移为零的条件。它与有限元法等耦合对于解决岩石力学问题也是一种有效方法。

上述几种数值计算方法都是针对连续介质,只能获得某一荷载或边界条件下的稳定解。对于具有明显塑性应变软化特性和剪切膨胀特性的岩体,无法对其大变形过程中所表现出来的几何非线性和物理非线性进行模拟。这就使得人们去探索和寻求适合模拟节理岩体运动变形特性的有效数值方法,即基于非连续介质力学的方法,主要有离散单元法、刚体元法、非连续变形分析法等。

离散单元法^[6,18]最早是由 Cundall P. A. 于 1971 年提出的一种不连续介质数值分析法。它既能模拟块体受力后的运动,又能模拟块体本身受力变形状态^[2]。其基本原理不同于基于最小总势能变分原理的有限单元法,也不同于基于 Betti 互等定理的边界单元法,而是建立在最基本的牛顿第二运动定律上。实际上,离散单元法的基本思想,可以追溯到古老的超静定结构的分析方法上,任何

一个块体作为脱离体来分析,总会受到相邻单元的力和力矩的作用,正是在其合力和合力矩的作用下,产生变形和运动。这种经典的思维方式,在计算机发展的今天,可以很容易地实现。以每个单元刚体运动方程为基础,建立描述整个系统运动的显式方程组之后,根据牛顿第二运动定律和相应的本构模型,以动力松弛法进行迭代计算,结合 CAD 技术,可以形象直观地反映岩体运动变化的力场、位移场、速度场等各种力学参数的变化。离散单元法是一种很有潜力的解题手段。这种方法突出的优点是适于模拟节理系统或离散颗粒组合体在准静态或动态条件下的变形过程。

最初的离散元法基于刚性体假设,由于没有考虑岩块自身的变形,在模拟高应力状态或软弱、破碎岩体时,不能反映岩块自身变形的特征,使计算结果与实际情况产生较大出入。离散单元法随着非连续岩石力学的发展而兴起,这种方法与现有的连续介质力学方法相比还有以下问题需要研究。

(1) 刚性体离散单元法基于非连续岩石力学的发展而产生,更适合于低应力状态下具有明显发育构造面的坚硬岩体的变形失稳分析。对于软弱破碎、节理裂隙非常发育和高应力状态下的岩体变形失稳分析,则并不十分适合。

(2) 岩体介质种类繁多,其性质极为复杂。在通常情况下,节理岩体或颗粒体表现为非均质、各向异性,并且常表现有很强的非线性性质,各自所处的地质环境各不相同,这就使得岩土工程计算有很多不确定的因素。和有限元、边界元确定计算参数遇到的麻烦一样,离散元的主要计算参数(如阻尼参数、刚度系数),影响到岩土工程稳定过程的正确模拟以及最终结果的可靠性,尤其是离散元计算中的参数选取,没有统一和完善的确定方法。

(3) 计算时步的确定。现在的选取原则是出于满足数学方程趋于收敛的条件,与实际工程问题中的“时间”概念如何联系起来,合理地考虑时间因素,是今后需要进一步研究的问题。

(4) 用刚性单元来模拟坚硬岩石之间的作用比较适用。对于软硬悬殊的岩体或颗粒体的变形模拟过于简单,计算结果与实际差距较大。

(5) 迭代运算的时间冗长。虽然不像有限单元法需要用大量的计算空间,但 CPU 占用时间较多,特别是在考虑岩块变形的情况下,模型划分单元数受到限制,对迭代方法需做进一步的改进。

刚体节理元法(RJM)^[1]是 Asai 于 1981 年提出的,它是在 Cundall 刚体离散元间夹有 Goodman 节理元的组合单元,但此节理元有一定厚度使离散元间不能“叠合”。刚体节理元法也可考虑不含节理元的情况,即所谓的单一三角形刚体元(STRE)非连续变形分析法^[7](Discontinuous Deformation Analysis,简称 DDA),是石根华博士和古德曼教授于 1984 年首次提出的一种新型数值分析方法。1988

年该方法已形成了一种较为完整的数值计算方法体系。非连续变形分析方法以严格遵循经典力学规则为基础,被认为是一种平行于有限元法的数值计算方法。该方法用位移作为未知数,解平衡方程式时用的方法与有限单元法中的结构矩阵分析相同,但非连续变形分析的块体刚度矩阵比有限元法分析中的单元刚度矩阵更为简单。非连续变形分析是用来分析块体系统力和位移的相互作用。对各个块,允许有位移、变形和应变;对整个块体系统,允许滑动和块体界面间张开和闭合。虽然它对非连续块体系统的分析是初步的,但不连续变形分析是以严格遵循经典力学规则为基础的。

而流形元方法^[2]是由石根华等人于1992年提出并不断发展的一种新的数值分析方法。这种方法是以前拓扑学中的拓扑流形和微分流形为基础,在分析域内建立可相互重叠、相交的数学覆盖和覆盖材料全域的物理覆盖,在每一物理覆盖上建立独立的位移函数,将所有覆盖上的独立覆盖函数加权求和,即可得到总体位移函数。然后,根据总势能最小原理,建立可以用于处理包括非连续和连续介质的耦合问题、小变形、大位移、大变形等多种问题的求解格式。它是一种具有一般形式的通用数值模拟分析方法,有限元法和非连续变形分析法(DDA)都可看做是它的特例。

由数值模拟方法的发展历程可以看出,数值模拟方法由最初主要为求解线性结构问题发展到结构非线性分析,由单纯结构力学分析发展到流体、热传导、磁力学及化学工程等各个学科。在这一进程中,随着数值方法基本理论的日臻完善,有的数值计算方法应用的领域和范围越来越广,如国际著名的有限元分析软件ADINA、ANSYS等。这些软件适用的领域十分广泛,但已有的研究表明,用某一种数值计算方法来概括所有领域的问题是不可能的。这是由于各个领域有其自身的特殊性和分析的重点。正因为如此,专门应用于各个领域的数值分析软件也得到了大力发展。如岩土工程领域,由于岩土材料具有高度的非线性,并含有大量的节理面和裂隙面,用一般有限元法来分析岩土工程问题存在很大的局限性。近15年来,专门为研究岩土工程问题开发的数值分析软件同样很多,应用效果非常好。如国际著名的岩土工程软件Itasca软件就是如此。

还有不少其他的数值分析方法和各种数值方法的相互耦合方法,在此就不一一列举。由于实际岩土介质具有模糊性、随机性和各种不确定性,因此,非确定性数值分析方法也有长足的发展。

二、数值模拟方法的发展现状

有限元分析方法最早应用于航空航天领域,用来求解线性结构问题。这是最早研究并应用于工程实践的数值分析方法,实践证明这是一种非常有效的数值分析方法。有限元法的核心思想是结构的离散化,将实际结构假想地离散为有限

数目的规则单元系统,即将无限自由度的求解问题转化为有限自由度的问题,通过建立数学方程获得有限自由度的解,这样可以解决很多实际工程中理论分析无法解决的复杂问题。理论已经证明,只要将求解对象离散为足够小单元的系统,有限元法所得的解就可足够精确地逼近于真实值。经历了 40 多年的发展,数值模拟方法的基本理论已经日趋完善,复杂非线性问题各种算法得到很大发展,并在工程领域得到了广泛应用。

近年来随着工程设计、科研等要求的不断提高以及计算机计算能力的快速发展,数值力学分析已经成为解决复杂工程分析问题的常规手段,其主要作用表现在以下几个方面:

- (1) 研究工程问题内在的力学机理;
- (2) 增加工程和产品的可靠性;
- (3) 在工程和产品的设计阶段发现潜在的问题;
- (4) 经过分析计算,采用优化设计方案,降低工程和产品的成本;
- (5) 尽快确定工程问题的设计方案,加速产品开发;
- (6) 模拟物理试验方案,减少试验次数,从而减少试验经费。

国际上众多机构早在 20 世纪 60 年代初就开始开发有限元算法和分析程序,但真正的有限元算法和分析软件诞生于 70 年代初期,而近 15 年则是各种数值力学分析软件商品化的发展阶段,软件开发商为满足市场需求和适应计算机硬、软件技术的迅速发展,对软件的功能、性能、用户界面和前、后处理能力,都进行了大幅度的改进与扩充。这就使得目前市场上知名的数值分析软件,在功能、性能、易用性、可靠性以及对运行环境的适应性方面,基本上满足了用户的当前需求。

目前各种数值方法的分析软件很多,如国际著名的有限元分析软件有 ADINA、ANSYS、MSC 等,这些软件功能大而全,但因不是专门为岩土工程问题开发,在解决岩土工程问题时,反而不方便,有些甚至很难进行,如分析软岩巷道的大变形问题、采矿工程中顶板垮落等问题时往往很难算下去。而这些软件应用在机械制造、空气动力学等诸多领域,预计的精度非常高。将这些软件应用于岩土工程领域造成的困难,是由岩土工程的力学特性和非连续性所决定的。这促进了专门用于岩土工程问题数值分析软件的开发。如 FLAC、UDEC 软件就是由美国国际著名岩土力学咨询公司 Itasca 花了 6 年时间于 1992 年开发而成,随后即成为国际岩土力学界的主导计算软件,是目前国际上公认的优秀岩土力学数值计算软件包之一。

国内也出现了许多商业化的岩土工程软件,如东北大学、同济大学、浙江大学、武汉岩土所等自己开发的岩土工程软件,但在规范化和商业化方面有时并不

十分理想,有些软件开发自己使用方便而其他人使用起来很费劲,另一些则在功能上仍需完善,在模拟采矿工程问题时空关系很强、涉及空间范围大的工程岩体稳定性时都比较欠缺。

事实上,数值力学分析软件已经成为越来越多领域不能缺少的工具。目前数值力学分析软件的发展主要表现在以下几个方面:

(1) 与 CAD 软件的无缝集成。在未来相当长的时期内,CAD 软件与数值力学分析软件还会有明显不同的分工。即设计和数据成图工作由 CAD 软件完成,分析要在数值分析软件中完成。数值分析软件的一个发展趋势是与通用 CAD 软件的集成使用,即在用 CAD 软件完成方案设计后,能直接将模型传送到数值分析软件中进行建模并进行分析计算,如果分析结果不满足设计要求则重新进行设计和分析,直到满意为止,从而极大地提高了设计水平和效率。

(2) 强大可靠的自动建模能力。数值分析求解问题的基本过程主要包括:建立分析模型、数值分析求解、计算结果的后处理三部分。对大多数数值分析软件来说,模型细化是建模的关键一步。模型离散后的网格质量直接控制求解时间、结果误差大小,同时软件网格剖分功能也关系到工作效率,因此多种不同网格的处理方法、强大可靠的六面体网格自动划分以及根据求解结果对模型进行自适应网格划分都是软件能力的重要方面。

(3) 由求解线性问题发展到非线性。随着科学技术的发展,线性分析结果已经不能满足复杂设计的要求,许多工程问题所涉及的接触装配、材料破坏与失效、非线性断裂、裂纹扩展等仅靠线性理论根本不能解决,必须进行非线性分析求解。例如薄板成形就要求同时考虑结构的大位移、大应变(几何非线性)和塑性(材料非线性);而对塑料、橡胶、陶瓷、混凝土及岩土等材料进行分析,或需考虑材料的塑性、蠕变效应时,则必须考虑材料非线性。当然大量的流体动力学分析、流场中移动壁面问题、流体/结构耦合分析是更高程度的非线性问题。众所周知,对于与时间相关的强非线性问题,传统的隐式时间积分有时无法满足求解的要求,这时要求程序在结构和多场分析中都具备显式积分算法。

(4) 由求解结构场发展到耦合场。数值模拟方法最早应用于航空航天领域,主要用来求解线性结构问题,目前数值模拟的发展方向是结构非线性、流体动力学和耦合场问题的求解。例如由于摩擦接触而产生的热问题,金属成形时由于塑性功而产生的热问题,需要结构场和温度场的有限元分析结果交叉迭代求解,即“热力耦合”问题。当流体在弯管中流动时,需要对结构场和流场的有限元分析结果交叉迭代求解,即“流固耦合”问题。由于数值分析方法的应用越来越深入,人们关注的问题越来越复杂,耦合场的求解必定成为数值分析方法和分析软件的发展方向。

(5) 程序的开放性。无论数值力学分析软件如何发展,都不可能满足所有用户的要求。这是因为很多用户处于工程应用或科学研究的前沿,有自己的特性要加入到软件中,完成特殊的分析任务。因此开发商必须给用户一个开放的环境,允许用户根据自己的实际情况对软件进行扩充,包括用户自定义单元特性、用户自定义材料本构(结构本构、热本构、流体本构)、用户自定义流场边界条件、用户自定义材料失效、结构断裂判据和裂纹扩展规律,等等。

以上几点,是数值力学分析软件近期的主要发展方向。另外为发挥硬件和软件资源的效能,大量采用平行处理技术,向软件网络化方向发展。

第二节 岩土及采矿工程问题特点及数值模拟方法

一、岩土工程问题特点及数值模拟方法

随着我国经济建设的高度发展,岩土工程稳定性分析问题日益突出且面大量广,在水利、交通(铁路和公路)、能源开发、城市建设和地下空间开发等行业存在着大量的岩土力学数值分析问题。如三峡工程总投资 1 200 亿元。崩塌和滑坡是三峡库区的主要地质灾害,目前已查出两岸规模较大的崩滑体达 2 490 多处,大小泥石流流沟 90 余条,三峡大坝蓄水后两岸崩滑体还将诱发新的地质灾害。有效预测和防治崩滑地质灾害成为重大的岩土工程问题。又如南水北调工程总投资达 1 240 亿元,是迄今世界上最大的水利工程。该工程跨越四大流域,涉及诸多岩土工程问题。再如西气东输工程总投资超过 1 400 亿元。工程全长 4 000 km,西起新疆巴音郭楞蒙古自治州的轮南,经甘肃、宁夏进入陕西,在陕西的靖边与长庆气田连接,再穿过黄河经山西、河南、安徽、江苏、浙江,东抵上海,横穿 10 个省市。又如西部大开发,由于交通运输工程、矿产资源勘探开发等大量岩土工程遇到的地质条件复杂多变,所涉及的岩石力学问题也越来越复杂。这些都对岩石力学提出了更高的要求,使岩石力学面临许多前所未有的问题和挑战,急需发展和提高岩石力学理论和方法的研究水平,以适应工程实践的需要。

国内外由于大坝开裂、岩土边坡失稳、软土地基问题、地震等众多灾害性事故,不仅给国家和人民财产造成了巨大损失,同时也表明,人类目前尚缺乏对岩石(岩体)材料的不规则性、复杂性和物理力学非线性本质的认识 and 解决这些问题的方法,致使许多岩石力学问题无法定量或定性地予以解释和分析^[1]。

为了合理地进行岩土工程及地下工程设计和施工,必须确切了解岩土特性及其由于自重、外部荷载或边界条件的变化而引起的岩体应力、变形及破坏的发展规律,对岩体的稳定性做出正确的评价。而大多数岩土介质均为非线性材料,在低应力水平作用下,表现出明显的塑性应变软化特性和剪切体积膨胀特性,其

力学特性与金属、合金及聚合材料完全不同。产生这种差异的主要原因是由于岩土介质的微观结构包括孔隙、裂隙、颗粒排列、胶结作用、分层效应以及流变性。研究岩土力学问题,应以固体力学原理为基础,充分考虑其多相构造、加载途径、时间效应、温度效应、胶结性质、节理裂隙、各向异性等特殊性质。但由于岩体是含有大量裂隙、多相介质的复合体,含有地层形成过程中产生的层理、节理、破碎带等异常地质结构,此外还有在采动过程中产生的裂隙以及岩体的破碎等。要准确地把握这种材料的力学性能是异常艰难的。这就严重制约着人们准确地获得解决问题的条件及岩体应力应变本构关系并建立相应的力学模型,因此常常无法获得问题的精确解。目前的处理方法大多只能是从宏观上来把握这种材料的力学特性,即把握岩体的宏观力学特性,并在某种假定下对问题进行简化,如简化为平面应变问题,或开展大量的现场试验研究。

自1962年以来,岩石力学的一个主要进展是引入计算机和数值模拟。开始时,岩石力学分析和计算的进展很大程度上依赖于其他工程领域的进展,特别是力学在这些领域中的应用。岩土工程中早期的数值模拟集中于有限单元法。该法最初是为结构分析和结构材料变形性质的研究而开发的。其特点是:①所用材料的力学性质可以由实验室试验精确地加以确定;②结构范围比岩体结构范围小得多;③整个结构的性能可以直接根据原型试验来确定;④很多场合,变形可以限制在线弹性范围内,而岩石结构中往往必须考虑大变形、大应变和非线性,很多场合中需要研究“峰后强度”的变化,这时结构可能破坏而呈应变软化性态。实际上即使精确地确定了岩石强度,也需考虑岩体强度高估的问题。

岩土工程问题具有以下特点:

- (1) 岩体性质具有可变性和不确定性;
- (2) 由开挖引起的载荷作用;
- (3) 研究问题的尺寸和时间变化范围大;
- (4) 地质条件呈复杂三维、非均质性和不连续性,含有大量的层理面、断层面和裂隙面;
- (5) 岩体的强度和变形特性未知,而且岩体的“峰后”性质重要;
- (6) 岩体中大量存在液体和固体的耦合作用,或气体和固体的耦合作用;
- (7) 研究的问题没有原型;
- (8) 需要根据开挖或建设时出现的不可预见的条件迅速改正设计;
- (9) 研究问题的数据有限;
- (10) 分析的主要目的为“理解机理”而非精确的定量计算。

针对岩土工程问题的上述特点,岩石力学主要研究以下内容:

- (1) 岩石、岩体的地质特征;

- (2) 岩石的物理与热力学性质;
- (3) 岩石的基本力学性质,即岩石在各种力学作用下的变形和强度特征,岩石的变形破坏机理及其判据,影响岩石力学性质的主要因素及其影响,包括加载条件、温度、湿度等;
- (4) 结构面力学性质;
- (5) 岩体力学性质,包括岩体变形与强度特征及其原位测试技术与方法、岩体力学参数的弱化处理与经验估计,以及岩体力学性质的主要影响因素及其影响;
- (6) 地应力分布规律及测量理论与方法;
- (7) 工程岩体稳定性,包括各类工程岩体在开挖载荷作用下的应力、位移分布特征,各类工程岩体在开挖载荷作用下的变形破坏特征,以及各类工程岩体的稳定性分析与评价等;
- (8) 岩土工程围岩控制技术;
- (9) 各种新技术、新方法与新理论在岩石力学中的应用;
- (10) 工程岩体的模型、模拟试验及原位监测技术。

随着岩石力学理论研究和工程实践的不断深入和发展,人们对“岩石”的认识有了突破。首先,不能把“岩石”看成固体力学中的一种材料,所有岩土工程中的“岩石”是一种天然地质体,或者叫做岩体,它具有复杂的地质结构和赋存条件,是一种典型的“不连续介质”。其次,岩体中存在地应力,它是由于地质构造和重力作用等形成的内应力。由于岩石工程的开挖引起地应力以变形能的形式释放,正是这种“释放荷载”才是引起岩石工程变形和破坏的作用力。因此岩石力学的研究思路和研究方法与以研究“外荷载作用”为特征的材料力学、结构力学等有本质的不同。已有研究表明,无论是岩体结构,还是其赋存状况、赋存条件均存在大量的不确定性。因此,必须改变传统的固体力学的确定性研究方法,而从“系统”的概念出发,采用不确定性方法来进行岩石力学的研究。

由于存在以上这些差别,1988年Starfield和Cundall指出:“岩石力学问题是数据有限的问题,需要采用与其他工程领域不同的设计方法。”米勒博士强调经典的连续介质力学解决岩土工程所遇到的复杂三维和不连续问题存在很大的局限性,并由此推动了岩石力学学科的建立,促进了对此类问题更有成效的研究。

数值模拟技术随着岩石力学及计算机技术的发展而发展。有人曾认为数值模拟方法以其优越的性能可以解决所有力学问题,因而对它的期望值很高。实际上,数值模拟方法是岩石力学理论和计算方法的计算机化,岩土力学本身的发展水平决定了数值模拟的可靠度。如果岩体的力学特性能像人工材料的力学特性