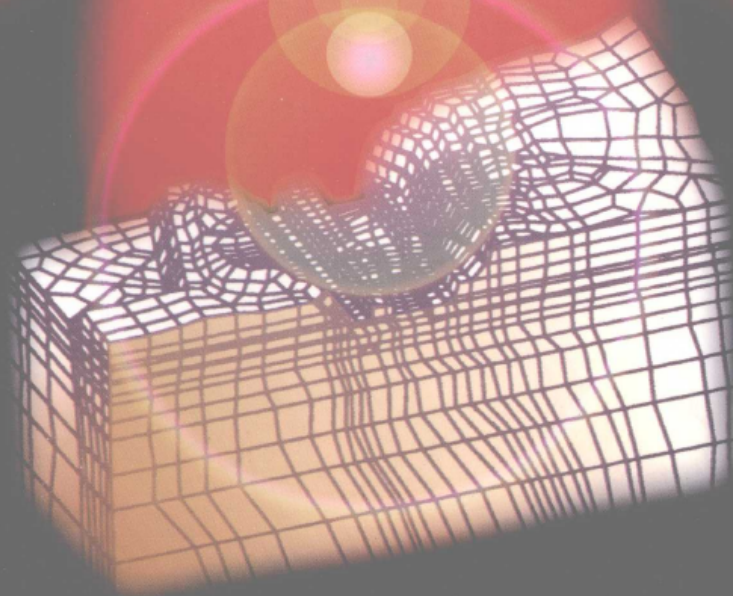


岩土力学数值分析 与解析方法

—— 第六届全国岩土力学
数值分析与解析方法讨论会论文集

陆培炎 史永胜 主编



广东科技出版社

岩土力学数值分析与解析方法

——第六届全国岩土力学数值分析与解析方法讨论会论文集

陆培炎 史永胜 主编

广东科技出版社

图书在版编目 (CIP) 数据

岩土力学数值分析与解析方法: 第六届全国岩土力学数值分析与解析方法讨论会论文集/陆培炎等主编. — 广州: 广东科技出版社, 1998.

ISBN 7-5359-2117-5

I. 岩…

II. 陆…

III. 岩土力学-研究-分析

IV. P634.1

出版发行: 广东科技出版社

(广州市环市东路水荫路 11 号 邮码: 510075)

E-mail: gdkjwb@ns.guangzhou.gb.com.cn

印刷: 广州市南燕彩印厂

(广州市石溪富全街 2 号 邮码: 510280)

规格: 850×1168 1/16 印张 36.75 字数 100 万

版次: 1998 年 7 月第 1 版

1998 年 7 月第 1 次印刷

I S B N 7—5359—2117—5/P·51

定 价: 100.00 元

如发现因印装质量问题影响阅读, 请与承印厂联系调换。

会议组织委员会：

主任委员：陆培炎

副主任委员：袁建新 哈秋龄 沈珠江 高大钊 郑颖人 谢和平
委 员：陈子萌 王泳嘉 朱维申 白世伟 李廷芥 叶柏荣
吴德伦 栾茂田 陈生水 陈重华 汪小刚 刘祖德
张利民 包承纲 余成学 殷有泉 杨志法 楼志刚
龚晓南 杨 敏 陈正汉 曹 洪 杨光华 冯遗兴
余诗刚 石光漪 陈湘生 杨 虹 殷宗泽

论文评审委员会：

袁建新 陆培炎 包承纲 朱维申
李廷芥 刘 雄 孔令伟 史永胜

前 言

第六届全国岩土力学数值分析与解析方法讨论会于1998年8月4日~6日在广州召开。本次会议由中国力学学会岩土力学专业委员会主办,广东省水利水电科学研究所承办。

中国力学学会岩土力学专业委员会在历届主任委员钱寿易教授、袁建新教授和高大钊教授的主持下分别在南宁(1982年3月22~26日)、西安(1985年11月4~8日)、珠海(1988年11月9~12日)、泰安(1991年4月9~12日)、重庆(1994年10月14~17日)成功地举办了五届全国岩土力学数值分析与解析方法讨论会。并于1987年6月23~28日在宜昌—重庆举行岩土力学与工程发展战略讨论会,1995年10月15~19日在黄山举行21世纪岩土力学专题讨论会,1992年11月11~18日和1996年11月5~8日在广州中山大学举办岩土力学与工程专题讲座。中国力学学会岩土力学专业委员会还和其它五个学会一起,主办《岩土工程学报》,积极支持召开三届全国青年岩土力学与工程会议和全国土动力学会议。

中国力学学会岩土力学专业委员会挂靠中国科学院武汉岩土力学研究所,历任所长钱寿易教授、袁建新教授、白世伟教授都支持学会工作。袁建新教授无论在担任主任委员还是目前担任副主任委员期间都在领导委员会工作,该所余诗刚副研究员和孔令伟博士是专业委员会秘书。

中国力学学会岩土力学专业委员会侧重于岩土力学数值分析和解析方法的研究,特别注意岩土力学新理论和新方法,它有两个特点,一是需要为我国的工程建设服务并从中吸取营养和寻找新课题,本论文集发表多篇三峡工程岩土力学研究的论文充分反映了这一特点;二是岩土力学需要其它学科如固体力学、流体力学、计算数学及计算机技术的渗透。

本次会议特别邀请中国科学院院士、中国岩石力学与工程学会理事长、同济大学孙钧教授对岩土力学(特别是岩石力学)计算方法的发展现状进行了总结,邀请中国科学院院士、南京水利科学研究院沈珠江教授对岩土本构理论进行了系统论述。在目前飞速发展的岩土力学领域,以下几个方面应引起我们的注意:(1)传统岩土力学与工程问题,包括在强度、变形、土压力、边坡稳定等传统领域的新发展;(2)岩土工程的大位移问题,如软土工程位移及其流动,边坡失稳的发育及其最终稳定;(3)土工织物在地基处理、边坡加固、回填、防渗工程中的应用及新的计算方法;(4)环境岩土学(Environmental Geotechnics),不仅有传统的滑坡问题、泥石流问题,还包括核废料处理、地下油库地下粮库等地下空间利用、城市工业与生活垃圾掩埋、深基坑开挖引起周边环境问题以及地表冲刷等诸多问题;(5)渗流问题;(6)岩土动力学问题;(7)计算机技术在岩土力学中的应用(Computational Geomechanics),如岩土工程的计算机表达与演示(Geotechnical Knowledge Representation)、多媒体(Multimedia)及万维网(World-wide Web or WWW)的应用、人工智能(Artificial Intelligence or AI)的应用、用户界面(User Interfaces)与计算可视化(Visualization)、计算机图形学(Computer Graphics)及计算机辅助设计(Computer-Aided Design or CAD)等。

适逢世纪之交,让我们携起手来,共同推进我国计算岩土力学的发展,使计算岩土力学的定量分析达到一个新的水平。

祝本次会议圆满成功。

中国力学学会岩土力学专业委员会
主任委员 陆培炎
1998.8

目 录

一、会议主题报告

世纪之交岩石力学研究的若干进展	孙 钧	1
砂土本构理论的检讨与重建	沈珠江	16
天然气开采地面沉降预测分析	刘宝琛	张家生 24
土的弹粘塑性模型和固结分析	殷建华	29
岩土塑性力学中几个理论问题的探索	郑颖人	36
桩土相互作用理论研究及按沉降控制设计桩基础的工程实践	杨 敏	艾智勇 43
三峡工程临时船闸与升船机边坡三维有限元分析	邓建辉	陈文胜 郑 宏 葛修润 60
三峡船闸高边坡稳定性断裂损伤流变分析	朱维申	李术才 邱祥波 张玉军 张强勇 66
岩体滑坡动力过程的数值模拟新方法	蔡永恩	梁国平 殷有泉 73

二、岩土力学计算方法

计算复杂弹性地基板的半解析、半数值方法	王元汉	谢 华	张佑启	80	
弹性地基杆系有限元法单元刚度的若干讨论	杨 敏	艾智勇	张永谋	85	
土体材料本构特性的数学分析			杨光华	92	
边界元法解平面问题和大单元			赵曼扬	98	
用扰动函数的方法计算土压力		罗晓辉	何立红	103	
土体变形分析的蒙特卡罗有限元法	白 冰	李建林	李遇春	107	
土钉墙极限平衡法可靠度分析		杨育文	袁建新	111	
深基坑围护结构的参数敏感性分析		熊巨华	杨 敏	116	
桩轴向荷载作用下工作特性的完整解析分析	刘兴远	郑颖人	林文修	121	
求解岩土工程问题的外部耦合算法		王可钧	李焯芬	126	
有限变形接触问题的增强 Lagrange 法		冯吉利	温科伟	邵 宇 131	
半无限长梁的样条无限元法		段继伟	李启光	139	
地基沉降的不等时距灰色预测	李 亮	胡绍海	傅鹤林	魏丽敏 145	
三维离散元法中的接触问题		焦玉勇	葛修润	149	
边坡稳定条分法的改进	罗晓辉	何立红	邹金林	张荣堂	陈洪江 154
饱和砂土水平荷载作用失稳分析		鲁晓兵	张加华	杨振声 159	
地基极限承载的运动单元法分析		曹 平	Peter Gussmann	162	
用模糊概率方法分析隧洞稳定的可靠性		徐 军	郑颖人	刘东升 168	
压剪应力作用下共线节理的弹塑性分析	王 成	李晓红	张建辉	邓安福 173	
围岩稳定性分类的神经网络方法			霍润科	刘汉东 179	
用 DDM 模拟岩体裂纹及节理面特性		王耀辉	李廷芥	184	
高等级公路软粘土地基的沉降分析			程展林	188	
基于节理网络模型的岩体 REV 数值估算	庞作会	葛修润	邓建辉	195	

不排水条件下土体有效应力分析方法的比较	濮家骝	吴佳晔	201
锚固土体机理与抗滑稳定分析研究	张 玲	李俊杰	207
基于有限块体模型的下限极限分析方法及其应用	栾茂田	黎 勇	212

三、岩土力学工程分析

金山店铁矿地表变形的离散模型数值模拟	陈文胜	邓建辉	葛修润	218			
弹脆塑性理论与三峡船闸开挖的数值模拟	任 放	盛 谦		224			
三峡大坝左厂 2 [#] 、3 [#] 、4 [#] 坝段坝基稳定性数值分析	丁秀丽	盛 谦	徐 平	231			
三峡船闸高边坡施工开挖变形的数值分析	盛 谦	付 静	任 放	238			
三峡二期围堰塑性混凝土防渗墙有限元分析	胡黎明	张建红	濮家骝	245			
软弱岩层中巷道非线性大变形数值分析	李庶林	桑玉发	周 辉	王泳嘉	249		
基坑变形的随机预测	时蓓玲	杨林德	杨学宏	255			
对刚性挡土墙上被动土压力的研究	杨雪强	庄心善	陈升平	262			
单侧开挖对地铁车站的影响分析	沈建华	杨文卫	倪光乐	陆培炎	269		
软岩中大型隧洞群的有限元分析			李青麒	275			
岩土结构分析可视化系统在反复采动中的应用	来兴平	伍永平	柴 敬	常心坦	282		
堤坝土体劈裂灌浆中裂纹的劈裂与扩展理论解			王士恩	刘超常	286		
DDA 方法在矿山裂隙岩层控制中的应用	邓广哲	苏普正	黄润秋	王建庄	刘汉斋	291	
层状土中轴向受荷桩—土相互作用分析			徐明定	徐 锐	296		
饱和软土中压桩过程的理论分析与数值模拟	鲁祖统	龚晓南	黄明聪		302		
纤维加筋土的有限元计算			介玉新	李广信	309		
插筋补强边坡的稳定性计算			张钦喜	孙家乐	315		
地基最终沉降量计算方法的改进	王杰光	谭景和	朱寿增		322		
软弱地基上高速公路填方路基纵向裂缝开展段稳定分析研究							
.....	王春江	李宏志	山 征	沈凤生	姬美秀	郝 鹭	326
用有限元方法研究软弱地基填方路基纵向裂缝的成因							
.....	王春江	李宏志	山 征	耿 晔	李 斌	姬美秀	333
矿山岩体破坏过程的计算机模拟					任建喜	339	
三维刚性元在稳定分析中的应用	张建海	范景伟	何江达			343	
高砗面板堆石坝非线性和弹塑性分析	刘松涛	程展林	陈 云	任志伟		350	
软土深基坑支护三维数值模拟计算	肖 明	郑建昌	俞裕泰			356	
荷载影响深度的非常规分析方法	刘 红		潘 健			360	
减少沉降量桩基的简化计算方法研究	窦远明	吕文学	刘春原			363	
变形控制设计理论在四联大厦桩基础中的应用	董建国	魏正康	王 陈			369	
边界元—有限元耦合分析弹性地基上加肋板	邓安福		干腾君			375	
多层土中深基坑桩锚支护的计算机算法			姚爱国			380	
粘性回填土的水平土压力问题	潘 健	刘 红	刘 伟			384	
DDM 在区域岩体初始应力场模拟中的应用	黄醒春		李 波			388	
小浪底进水口引渠导墙的稳定分析研究	沈凤生	李 斌	郭朝文	耿 晔		394	
平面有限元数值分析系统的开发				陈尚桥		400	
综放开采顶煤三维变形、破坏的数值分析	谢和平	陈忠辉	王家臣	徐林生	田利军	蔡永生	405

用BP网络预估强夯有效加固深度..... 汤磊 陈正汉 412

四、岩土动力学计算分析

层状地基内饱和土层强夯流固耦合分析	孔令伟	袁建新	416
软土隧道抗震分析	朱祖亭	周健	423
软粘土地基的震陷分析	许朝阳	周健	429
高灰渣坝三维抗震动力反应分析	戚佩江	周健	433
大型渡槽(含地基与桩)整体动力分析	赵剑明	王瑞永	张崇文 439
软弱结构面对岩石边坡地震反应的影响	何蕴龙	陆述远	446
渗透固结理论与动力反应分析的讨论	林本海	谢定义	452
利用波数法分析动力基础响应		魏新江	457
动态极限平衡与动强度指标的确定	朱博鸿	廖红建	周龙翔 童华炜 463
用加载-卸载双线性模型分析强夯加固机理	李本平	陈燕顺	吴世明 469
软粘土地基的强夯机理及工艺特点的探讨	郑颖人	冯遗兴	周良忠 陆新 李学志 475
循环荷载下砂土的弹塑性模型	邱长林	闫澍旺	483

五、岩土介质渗流计算

非饱和土坡入渗规律的数值模拟	陈善雄	陈守义	488
有自由面渗流问题的流形方法	王水林	葛修润	494
裂隙岩体渗流场有限元分析中几个问题的讨论	张家发	李思慎	498
降雨条件下土坡水分运动数值模拟	陈善雄	陈守义	502
混合有限分析法解有压渗流问题		廖建三	507
3D Numerical Analyses for Effects of Drainage Pipe on Slope Stability under Rainfall			
..... Cai Fei Keizo Ugai			512
混凝土重力坝渗透系数反演分析	刘迎曦	李守巨	周承芳 李正国 路振刚 陈祖坪 519

六、岩土工程实验、测试及其他

岩石拉剪流变特性及其参数研究	李建林	朱子龙	524
加载系统对岩石流变试验的影响	刘宗光	罗哲	孟明荣 郭澍烈 528
用声发射监测技术预报岩体稳定性的可行性研究	吴定洪	陆业海	534
基于激光全息干涉法的岩石裂隙扩展破坏研究	刘冬梅	刘朝马	余拱信 540
地基加固质量的探地雷达检测应用初探	吴晋	徐兴新	陈嘉鸥 吴相安 叶斌 545
滑动测微计在岩土工程中的应用	李光煜	陈尚桥	550
表面波检测混凝土裂缝的数值分析	夏唐代	吴世明	魏新江 555
两个地基处理工程实例的对比分析	汤磊	陈正汉	559
攀钢露天铁矿边坡变形破坏模式的探讨		王正国	563

世纪之交岩石力学研究的若干进展

孙 钧

(同济大学 上海 200092)

提 要 本文将对以下内容作扼要评述。显然,它只能是笔者一些年来在研究工作中所猎及到的若干方面的问题,并未图求涉取岩石力学进展的全面,当可请读者谅解。这些方面列写为:

(1) 岩石力学与工程中的软科学方法

- ①非确定性分析方法与工程可靠度设计
- ②系统分析方法
- ③综合智能分析方法

(2) 岩石力学问题的反演分析

- ①非线性反演问题的随机理论与方法
- ②参数估计与模型辨识

(3) 几种有前景的新的数值方法

- ①半解析元法
- ②分形块体力学法
- ③非连续变形分析(DDA)法
- ④非线性大变形问题有限差分(FLAC)法
- ⑤流形元法
- ⑥耦合场问题解析

(4) 计算机新技术科学在岩石力学与工程中的采用

- ①工程施工三维系统仿真模拟研究与应用
- ②地理信息系统(GIS)在岩土公害险情预报与分析中的应用——岩土环境保护工学

(5) 岩石力学研究方法的演变与进展

关键词 世纪之交;岩石力学进展

1 岩石力学与工程中的软科学方法^[1]

软科学系泛指的一门综合性的学科,它是当前科学技术高度分化而又高度综合的产物。生产实践提出了要求能将软科学方法用于解释与处理现代科学与技术发展中出现的各种错综复杂的现象和问题。软科学方法有望为问题的解决提供一种优化方案和手段以及合理、有据的技术决策,可谓另辟了一条很有前景的蹊径。如果仍沿用过去传统的、经典的力学分析理论与方法,人们已经发现存在着许多问题与不足。这反映在:首先是工程实际问题都带有相当的随机性、模糊性和不确知性;其二,对许多带全局性、综合性的问题都要求作出系统分析,这样,在吸取已有知识、数据和经验等重要方面,沿用传统力学方法进行计算分析显见将有极大的局限性,甚至完全无能为力。

软科学方法的门类实在不胜枚举,从大类区分可大致写述为:

- ①非确定性分析方法;
- ②系统分析方法;
- ③综合智能分析方法。

事实上,上述三个方面往往彼此间相互渗透、交叉与融合。

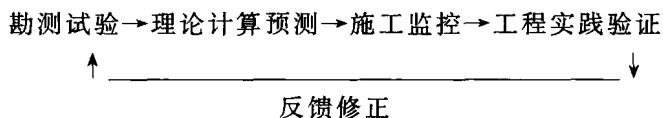
1.1 非确定性分析方法

于1994年在智利召开的一次国际岩石力学学会年会上已有这方面的有关报导。它提出了:(1)建立非确定性模型(nondeterministic model),讨论了岩石力学与工程中主观上和客观上的非确定性问题,也即模糊性和随机性的问题(Einstein, MIT);(2)岩石力学问题的随机理论与方法,研究岩石工程的随机分析与可靠度设计(Hoek, Toronto)。一些岩土非确定性因子,包括:其一,客观上固有的非确定性因子,主要有:(1)荷载环境的初始地应力场值;(2)介质地质环境的岩性参数;(3)不同施工环境与条件,如岩土与结构材料及与以上的多种不利组合等都是。其二,主观上的模糊性及其非确知性因子,主要有:计算模型、参数选取、计算假定、计算简化、计算图式、测量精度以及设计施工数据与信息量不足,等等。这类问题涉及的主要方面似包括:(1)岩体及其支护随机性失稳与破坏的机理及其判据;(2)岩石结构系统与岩体参数的统计分析、模式识别与参数估计;(3)岩体随机场概率模型以及岩石介质与支护体系的概率相互作用及其随机数值分析计算,等等。而这些方面研究的主要问题看来有:(1)概率论与数理统计及其应用于岩石工程的可靠度设计,以及用Markov过程进行隧洞开挖中的岩体地质预报;(2)随机过程方法,含时间序列分析法,它是一种纯数学的理论模型与方法,有如对岩土体的力学行为及其变形位移的随机预报,如要求建立其概率随时空域变化的方程(Chapman—Kolomogorov方程)并对其求解等;(3)模糊数学方法,提出了一种模糊数学语言的定量表达方法,也即隶属度(membership grade)的概念。这方面的内容大体有:岩石工程量的模糊综合评判和智能模糊推理、模糊概率和模糊可靠度、专家思维过程的模糊模拟等各个方面;(4)灰色系统,主要指灰色预测与灰色聚类分析。

从晚近一些年来国内外报导的文献看,还可以举出模糊数学在岩石力学与工程中若干具体应用的方面,诸如:岩石分类问题、节理岩体的模糊抗剪强度、地下洞室岩爆预测的模糊数学综合评判、岩层质量指数的模糊表达,以及地下工程支护方案的模糊决策研究等等,都有阶段成果。灰色系统除已广泛应用于工程规划、预测和决策等重要方面之外,80年代末亦已引入岩石工程;用于岩体力学量的时空延拓分析和岩坡位移预测,等等,不一而足。

1.2 系统分析方法

众所周知,岩石工程的勘测、规划、设计和施工几者是互为依赖并又综合相成的一个整体系统,其构成要素为:



此即近年来所谓的信息化设计、施工。采用系统分析的思想和方法,开展跨学科的正、反分析研究,其中,(1)正分析,有如:宏观地质条件分析→试验数据资料分析→求解初始地应力场值→模拟岩体开挖计算→与现场监测成果的对比研究→工程实践检验;(2)反分析,有如:用现场监测数据进行岩体参数和岩性参数反馈,以反馈并修正原先正分析中的问题。反演工作应含:(1)本构模型仿真(model simulation);(2)系统辨识(system identification);(3)模型参数估计(parameters estimation)。后二者将在本文后述的一节中再稍作展开介绍。

系统分析方法一般说来应包括:(1)系统论;(2)信息论;(3)控制论等三个方面的论述。

1.2.1 系统论——系统工程

工程系统在于强调指出各个事物都不是其组成部分的简单迭加,而是相互关联、制约与影响的有机整体。这样,将岩土体视为一个系统,岩土体的诸基本特征即为其各个组成部分。对各部分、各过程间作协调

研究,着重彼此间内在的相互联系及其系统的整体性。例如,采用隧道新奥法(NTAM)施工就是具体体现和实施上述系统工程的一处典型应用。与系统工程联系最为密切的是运筹学(Operation)及最优化技术(Optimization),后者已在岩土参数非线性反演分析中得到了具体应用^[2]。

为了说明问题,下面简述一下矿巷地质灾害系统分析的“缺陷树方法”,作为上述系统分析的理论和方法在矿巷灾害研究中的应用。缺陷树分析法(FTA),也称“事故逻辑分析”,是工程灾害系统分析的一种主要方法。该法对工程灾害进行系统分析的要求为:预测复杂工程系统发生灾害的可能性,总体上把握灾害发生的特点和规律,进而作出定性和定量分析。在岩土工程设计、施工、运行和管理中预警灾害的危险性并实施安全措施。采用此法能对矿山地下工程各个系统的多种灾害(如火灾、水淹、震害、瓦斯爆炸、塌方、电击、通风不良而窒息,等等)多因素复杂系统的灾害问题进行分类、起因辨识、预测和评价。它的构思是以酷似“缺陷树”图形的方式作描述,其基本思想是:(1)将待要分析的灾害视为“顶事件”;(2)将产生该事件的原因称作“缺陷事件”;(3)将“缺陷事件”在缺陷树框图中绘在“顶事件”的上方;(4)将以上两者用“逻辑”和“门”相连接;(5)将缺陷树的原因分析列在图的最下方,亦同样用“逻辑”和“门”将其与“缺陷事件”相连接;……,以此类推,直至列出发生“缺陷事件”的最基本、最主要的原因(称为“基本事件”)后为止。以上各种“事件”及连接它们之间的“门”,构成了酷似一株大树般的图形,故称之为“缺陷树”。如何建立指定“顶事件”的缺陷树是这一系统分析方法的解题关键。该法还曾被采用于研究导致城市地下铁道运行功能瘫痪的系统分析,其实质也与上述矿巷灾害情况相近。

1.2.2 信息论

信息论系从统计学的观点来研究工程中的信息系统,把系统抽象为信息变换过程来实现一种有目的的运动。它给出事件信息量的度量值,并使其具有可加性,这样,就有可能将信息可加原理应用于诸如岩土的反分析等一类问题。信息论认为,岩土系统未知状态的认识(后验信息)系由观测信息、先验信息和理论信息三者的综合。由此,将可得到信息量很充足的状态认识。可以预期,将信息论用于岩土体的变形预报,其前景是喜人的。

1.2.3 控制论

此处所谓的“控制”,是指施控者选择适当的手段作用于受控者,以期引起受控者行为发生预期变化的一种策略性的主动行为。如果将环境对系统的作用视为系统输入,而将系统由此产生的效果则视为输出,则采用这种输入和输出来描述岩土系统,在控制论中将具有其基本性作用。为了能描述系统的内部特性,在控制论中还采用了功能模拟和状态变量法则,应用控制论方法于岩土工程问题,诸如岩土力学反演分析和岩土工程施工反馈技术等等都是较典型的例子。这里,施工反馈技术被视为一种策略,即根据由控制系统产生的输出(如指岩体变形位移),作为决定对施工对象如何控制的依据(此处如指开挖方式和支护决策等等)。其具体实施常多体现在:

开挖与支护→量测变形位移并监控→预报并作反分析→再正分析岩体稳定性

↑ _____ ↓

(下一循环)

可以再举一些采用的例子。有如:对矿山生产施行实时控制,通过改变矿山一些内部因素来实现最佳水平的产值。这些因素可以包括:提高矿床的经济品位,选择采矿方法和回采面积,实现采掘设备自动化,以及高工效、低投入等等。又如,应用系统控制理论对岩体流变(时域变形)动力系统进行分析和综合,是完善岩体工程结构物稳定性的一种行之有效的方法。这里,对具有随机参数和随机输入的随机岩体介质言,它通常都具有无穷个自由度、由偏微分方程组所描述的这类分布参数系统,在状态空间内分析研究岩体工程系统的主动和被动控制问题,将是一项极有价值的探索方向。为此,可以试列出岩体工程系统控制理论的如下若干研究课题:岩体非线性流变模型的系统控制理论;多输入、多输出(MIMO)问题,同时又具有随机参数和随机干扰的岩体随机控制系统理论;岩体分布参数自适应控制问题;岩体工程系统主、被动控制

的实施,等等。

1.3 综合智能分析方法

可以分以下方面作一简单介绍。

1.3.1 智能科学的若干概念及其进展

智能科学的主要任务在于研究如何使用计算机来模拟人们的思维,这就是一种智能行为。科学发展到今天,将工程技术走与智能科学相交叉结合的路子来发展,就有可能产生一个飞跃,进而从根本上改变目前单纯依靠硬科学来解决工程实际问题的现状,这方面的前景是喜人的。在上几个世纪的工业革命时代,人们采用机器来代替繁重、单调的体力劳动,被称之为一次生产力的革命,今天,人们又开始了另一次生产工具和生产力的第二次革命,即利用新一代计算机的高速运算及其庞大的机器内存,特别是它的卓越的逻辑推理性能,可以在很大程度上用以模拟、代替(甚至超过)人类脑力劳动,做出所要求的成果。这便是智能科学这门新学科的任务——它是一种新生的生产力。《第三次浪潮》的作者说得好:“赋予工具以智能,它可以模拟人们的思想而不是筋骨,这项新技术将不再是扩展人类的体力,而是开拓人的智力。”这就是今天有别于前些世纪工业革命的不同特点与巨大进步。现在人们从信息科学的发展已可预测,21世纪将会有一门新兴产业——“智能产业”问世。它由智能计算机和智能应用系统两大部分所组成,单就这种智能系统的产值言,估计它将会超过每年35 000亿美元,这是一个多么庞大的数字!

1.3.2 人工智能(专家系统)和人工神经网络

通常说来,智能科学包括人工智能与神经网络。人工智能当前的进展主要反映在如何使计算机来模拟人们(专家)那种基于直觉经验的推理过程,使智能技术在专家们直觉经验的基础上再与计算机所赋予的逻辑推理相结合,以求更进一步地模拟与代替专家的智能。这是一个极有重要意义的研究方向,这方面当前最活跃的一个分支学科领域就是对人工智能决策专家系统的应用研究。专家系统不同于以往工程中习惯用到的工程师经验与工程类比方法。研制某一专业的专家系统都要求有三方面人员组成:智能工程师(也即知识工程师)、领域专家和计算机软(硬)件专业人员。清华大学刘西拉教授认为,今天,“知识工程”应该作为大学工科本科生的必修课,这是很有见地的。专家系统是人工智能科学中应用最为活跃而又最有成效的一个应用领域。专家系统实质上是基于“知识”和“数据”相集成的智能系统,它拥有领域专家的知识、经验和掌握的第一手数据资料,借助于逻辑推理方法来解决众多原先需要专家才能解决的复杂的、特别是带综合判断与决策性的问题。在笔者从事研究的岩土工程方面,国内近年来就已研制了诸如:围岩分类、洞室地质灾害险情预报、环境土工公害监测与控制、早期人防工程的兴废评估与决策,等等。但是,用于商品化程序软件尚待借以时日。专家系统的特色在于它赋予计算机以智能推理、知识与数据的结合以及系统学习三个方面的能力,它使计算机的作用由早前一般的数据处理发展为知识处理,这应该是一次质的飞跃。人工智能专家系统的独特功能特别在于:当问题决策中所必需考虑的可能状态数目越多、越复杂,问题的解决越带综合性,或所做的思维形式主要是推理而不是公式演算或仅借用现有程序就可作数值分析而得出结果时,它的技术性能则发挥得愈益显著。

下面再来谈谈智能科学的另一分支,即人工神经网络问题。上面说的人工智能技术,它归属于对人脑智能的一种功能模拟,已如上述,它还只局限于对人类思维的逻辑推理模拟阶段;而人类思维的直觉联想则尚必须走人脑智能的结构模拟的路子。这样,智能科学领域80年代兴起的一门新的分支学科——人工神经网络的理论和技术,为这一问题的解决带来了希望,它为探索领域专家的直觉联想模拟开辟了一条路径,它也是当今信息科学研究的一个热点。神经网络是基于模拟人们大脑的结构所构成的一种信息处理系统,它由多个经常是比较简单的处理单元彼此之间按某种方式相互连接,依靠系统自身的状态对外部输入信息的动态响应来处理这些信息。它往往采取联想的方法来获取存贮在网络中的知识,很类似于人们的联想回忆。它也可以建造基于这种神经网络的专家系统。

综合上所述,人工智能与神经网络表现了两种不同的思维方式。它们的共同基础即是对信息的处理,

但两种方法处理信息的机制与内容则各有千秋并相辅相成,正好构成了智能科学理论的完整框架。在土木工程中,它们都特别适用于解决那些复杂而又带高度综合性问题,诸如:方案、规划、论证、识别、决策和预测、预报等等问题,用途极为广泛。如何将人工智能专家系统与神经网络二者更好地有机结合,构成“集成智能”的方法,可能是今后智能科学进一步发展的主要方向。

在岩石力学与工程方面,国内最早的专家系统用于岩体分类;随后,针对解决不同的技术问题研制了相应的各种专家系统,有如:早期已建人防地下工程的兴废决策专家系统、隧道及地下结构岩溶灾害预报专家系统,以及采矿巷道围岩支护设计专家系统和结构性岩质边坡稳定性分析专家系统,等等。这些专家系统多数是以产生式规划(production rule)组成的知识库,对于处理不精确性问题一般都采用了本文上述的模糊推理或概率统计方法。嗣后,有关岩石力学在这方面的专著也陆续出版,如《回采巷道支护形式与参数合理选择专家系统》(李效甫等,1993)和《岩石力学与工程专家系统》(冯夏庭等,1993)。北方交通大学张清教授在国内率先将人工神经网络引入岩石力学与岩石工程,有如:岩石力学行为的人工神经元网络法预测研究,近年来又将其拓展应用于岩石工程系统和岩石工程参数重要性分析;在采掘巷道分类指标问题的聚类分析方法以及巷道支护策略研究等方面亦已有初步应用。值得一提的还有,九十年代中叶,一种称之为“实例类比系统”(case-based reasoning system)也被引入了岩石工程,它可以充分利用已建成的大量工程实例(case)的成熟经验来指导今后同类工程的设计和施工。

1.3.3 智能采矿学和岩石力学智能化问题^[4]

智能采矿的核心问题是谋求建立实时矿山智能控制系统,这里,矿山内部因素的改变将是实现智能采矿的关键,此外,如建造智能矿山机器人等问题都是实现高效智能采矿的基础。关于今后一个时期内智能岩石力学方面的研究内容可能有:岩石力学问题的推理和求解方法;岩石力学模式的自适应识别;基于工程实例的机器类比与联想;岩石力学不确定信息的处理;研制适用于岩石工程复杂问题的专家系统;岩石力学与工程方面的知识学习;信息反馈、闭合与求精方法;测试技术的智能化,以及关于智能决策方法的集成技术,等等,许多研究方面与工程实践应用还有极大量的工作要做。

研究岩石力学智能问题要求采用系统科学的观点,从上述信息论的新的思维方式出发,从系统整体以及它的不确定性和高度非线性等角度来进行探讨。此外,还要求理论研究与工程应用相结合,把诸多地质因素、环境与工程因素以及施工因素等统一起来综合考虑,提出比较合理的决策结果,并应用到岩石工程中去检验,使能在不断实践中来完善和发展智能岩石力学。

2 岩石力学问题的反演分析

2.1 非线性反演问题的随机理论与方法^[5]

岩土力学的反演分析方法是一门引入系统论的概念和原理而派生的新学科分支。现有各种岩土非线性反演问题仍都只局限于对确定性逆分析方法的求解,即把岩土介质在初始地应力和后续开挖荷载作用下的变形历程及其力学状态转换为一种静止的、确定性的过程作简化处理。极大量的岩土工程实践都表明,如果改用包含有客观上的随机性、主观上的模糊性和诸多不确知因素很强的位移信息,而仍沿用传统的确定性模型参数作反演表征的岩土地层特性进行分析计算,它与实际测试结果相比较将会有很大出入。存在的问题主要反映在:岩土地层的变形历程客观上是一种典型的非确定性过程,加之在观测工作中又带来一定的主观任意性,因而进一步的工作应该谋求借用随机系统论的方法来建立岩土力学与工程问题反演分析的随机理论。

晚近,我们学科组在岩石力学非线性反演的随机理论与方法方面取得了一定的进展。这主要表现在,其一:在岩土力学与工程中对各类逆问题的系统建模原理和方法,包括处理观测工作中诸多不确定性因素需用的最优目标函数,以及对模型的不确定性与最佳信息准则目标函数拟定等方面的问题有了较为系统

的研究成果。其二:在岩体变形随机预报理论及其工程应用方面,着重探讨了对地下工程周边岩土介质变形作随机预报的原理和方法,包括岩土体稳定的可靠性评价以及循环更新监测技术的采用。其三:采用扩张卡尔曼滤波器(Kalman Filter)有限元法分析地下工程岩土体介质非确定性非线性动态响应问题,开拓了采用扩张卡尔曼滤波器有限元法的基本原理和方法实施,及其在岩土介质变形时间历程和最终塑性区大小部位与范围的估计等方面的工程应用。以上三方面的工作还包括,针对水电、矿山地下工程和公路隧道等方面的许多处进行了实例分析。此外,并已研制了若干可便于工程推广的专用计算机程序软件。

以上一些研究工作的成果似可归纳为:

①在岩土力学与工程的系统辨识理论与方法方面,对识别描述岩土介质物理性质的本构关系问题,通过研究建立了岩土介质分布参数系统的偏微分方程描述连续介质力学模型;对岩土介质系统物理本构关系识别的理论和具体方法也作出了较为系统详尽的探讨。

②在岩土体变形随机预报理论与方法方面,对(1)岩土工程量测变形数据的时间序列相关分析;(2)岩土系统变形依时历程的随机性态;(3)工程岩土体稳定性的概率预报等都有一定的阶段成果,并由此率先提出了岩土体变形随机预报的理论与具体实施方法。所研制的专用软件已在多处工程实践中得到应用与检验。

③详细推演和分析了卡尔曼滤波器的数学原理与其物理特性,对随机动态过程中诸待估岩土参数与岩土位移观测值的相互关系进行了具体分析计算。针对地下工程岩土介质体动态过程的非线性随机性,建立了能以反映岩土场域随机动态过程的设计模型,研制开发了可操作性强的 DEKFEM 算法软件。上述成果并已在若干岩土工程的实践中得到了采用。

2.2 参数估计与模型辨识^[6]

从岩石力学逆问题及其研究的进展方面看,首先应归结于对参数估计与模型辨识两者从认识到应用上已有较丰硕的研究成果。

参数估计亦称参数反演、参数辨识或位移反分析(back analysis of displacement),是基于实测位移反求系统中某些参数值的一种逆问题(inverse problem),现已被广泛应用于地震、结构、振动等复杂工程系统中,用来确定对认识系统和作进一步正定分析都至关重要,但传统的方法又较难求得其特定诸参数。作为在岩体工程中的应用,逆问题自从 1976 年在约翰内斯堡的岩土勘测研讨会上由 Kirsstan 提出以后,经 Gioda, Sakurai, Maier 和 Cividini 等许多学者的发展,已在计算技术和工程应用方面取得了多层次的进展,在岩体工程结构控制体系中逆问题扮演着重要的角色。

岩体工程中参数辨识的内容主要包括以下几方面:

- ①地层压力参数辨识,通常指地层与支护结构之间相互作用力的辨识;
- ②初始地应力场各分量的辨识;
- ③岩体变形参数(指弹性模量 E 和泊松比 μ)的辨识;
- ④岩体强度参数(指内粘结力 c 和内摩擦角 φ)的辨识;
- ⑤岩体本构模型参数的辨识;
- ⑥某种特殊岩体结构(如软弱夹层)几何尺寸的辨识,等等。

对上述参数辨识的研究在七十年代初至八十年代中为一个鼎盛的时期,各领域人员在此期间发表了大量的科技文献。在国际上有代表性的如日本的 S. Sakurai, K. Arai, 意大利的 G. Gioda, G. Maier 等人,在国内有代表性的如中科院地质所杨志法提出的有限元图谱法反求初始地应力,同济大学杨林德建立的反分析边界元法及粘弹性问题反分析等等。作者等用最小二乘法建立目标函数,通过全局最优化,可同时辨识初始地应力三个分量及变形和强度 4 个参数,从实践上得出了非线性逆问题的唯一解,并将该方法应用于天生桥一级电站右岸试验洞上述 7 个参数反演计算,其结果与实测值吻合良好;1990 年,在中国岩石力学与工程学会年会上我们又提出了岩石力学反演分析的概率方法及其工程应用。

作为岩体工程逆问题之一,无论国内还是国外,无论是具体辨识的内容还是辨识中采用的数值及优化方法,可谓硕果累累;尽管这一领域还有许多工作要做,尤其是非线性问题参数反演结果的唯一性和稳定性方面,还有待作进一步研究,但总的来说已经比较成熟,作为岩体工程分析技术的一个独立分支正发挥越来越大的作用。

参数的辨识,包括模型参数的辨识,都是在本构模型的物理关系结构式已给定的情况下进行的,然而,如上所说,参数和模型的正确抉择是岩土力学研究中的两大难题,在模型的正确给定方面就尤为如此。尽管借鉴非连续体介质力学、各向异性体力学、断裂力学、损伤力学等力学分支的有关理论与方法,对岩体这种复杂介质从理论上可望导出更符合实际的模型,但不可避免地都包含了一些不易确定的参数,从而在实际应用中仍将受到很大限制。现实情况是:无论理论分析、数值方法还是反演计算(指岩体和岩性诸参数),对于“为什么要采用这样的模型?”,回答往往只凭经验、岩样试验及导出该模型所用的假定条件,而这些因素又往往与实际情况有着较大的差异,从而导致在同一模型下的正演预测与实测结果出入还比较大。

系统模型的辨识是应自动控制的需要用以确定复杂不确定系统等价数学描述模型而产生的一门技术,现已被广泛用于涉及控制、预测及做进一步深入分析的各个领域。工程岩体是一种复杂的不确定系统,原因是任何岩体工程项目不论研究的最终目的是为了安全、设计或者是经济需要,都受到多个因素的制约:大的方面来说包括施工因素、地质因素及其它客观上的随机性和人为的主观模糊因素;而每一大的方面又包含有若干小的方面,小的方面又受到若干更小因素的影响,并且这些方面并不是互相独立的,是互相交叉、融合的,比如,施工中的爆破和卸荷会对地质上岩体内原生裂隙扩展造成影响,从而构成一个复杂系统。就是岩体本身的力学行为而言,多年来人们一直将其视为单一介质,采用经典力学的方法从正面进行分析,这一作法当初曾解释过一些现象,并使人们的认识提高了一个层次。比如,在开挖后的洞周会产生应力集中,洞周围岩会首先出现塑性破坏等等,随着人们认识的不断深入,发现影响岩体力学行为的除岩石本身以外,各种岩体结构面和弱面是一个主要的因素,于是考虑问题更接近实际一些,但解决问题的方法仍然是正面分析,不过是增加了假设,增加了更多待确定的参数,如此等等。在这样一条路上,人们致力研究许多年,应该说在定性方面的认识更加深入,但在满足工程实际愈来愈高量化需要方面还显得无能为力。前节所述参数反分析可以说是这一背景下产生的结果,从而揭开了岩体力学问题研究的一条新途径。目前,将岩体作为系统研究已不乏其例。对于复杂的系统通过辨识技术得到其等价的数学描述模型,然后再进行深入分析,是一种有效的途径。对岩体的本构模型作正面的研究已有很多,但模型辨识问题的提出则还只是在参数辨识出现之后。根据作者对有关文献查阅的结果,在岩体本构模型辨识方面最早见于1977年在一次学术讨论会上由L. Jurina, G. Maier和K. Podolak发表的一篇题为“岩石力学中的模型辨识问题”,1987年,G. Gioda和S. Sakurai在总结参数反分析的研究成果和进一步有待发展的反问题的基础上也曾提出如何选择最佳模型的问题。但可惜语焉不详,还不能真正解决实际工程问题。

总之,在岩体本构模型的辨识,尤其是与时间有关的粘弹、粘塑性本构模型的辨识方面的研究还极少,纵观已有的研究成果还可以发现,目前的模型辨识都是从实测数据出发,建立一个最佳的模型决策器,然后从一个不大的有限的模型集合中遴选出一个最佳的模型这一方式。如何从一个包含有结构参数和模型参数的一般通式中或称之为无限模型集合中通过一般辨识原理得到最佳模型,至今未看到有这方面的研究报道。鉴于模型辨识在岩土工程分析中的实际意义和目前的研究现状,在这一方面还有很多的工作要做。我们学科组结合指导博士学位论文写作,对此也作了一些初步尝试^[7]。

岩石力学逆问题的提出与研究是岩石力学领域内的一次突破,它不同于传统的岩石力学研究,但也不是完全脱离了岩石力学已有的研究成果,而是将工程岩体视为一个系统,它是一项集岩石力学已有研究成果、优化技术、系统控制方法于一体的综合性研究。由于它的第一手资料源自于工程实际,使得在逆问题研究结果基础上的正面分析具有较高的可信度,因此在岩体工程实际上无疑将具有良好的应用前景。然而,在这一领域还有许多要进一步研究的问题。1987年,G. Gioda和S. Sakurai在系统总结了基于岩土工程现场监测进行反分析数值技术方面的发展情况,进一步讨论了反分析在辨识地层与结构之间相互作用力、现

场应力状态以及岩体材料参数等方面的应用后,最后指出了在岩土工程逆问题研究中的四个主要的发展方向,它们分别是:

- ①基于现场观测值,对静态的岩土材料响应,确定其复杂的本构模型;
- ②将反分析技术进一步扩展到对动态问题领域的研究和应用之中;
- ③进一步研究概率反分析方法在工程设计问题中的具体应用;
- ④不仅要探讨对一个优先选定的材料模型如何确定其最佳模型参数,而且要研究在所有可能的模型中如何抉择能够更好描述岩体实际力学行为的最佳模型问题。

3 几种有前景的新数值方法

3.1 半解析元法⁽⁸⁾

半解析元法(包括半解析有限元法与半解析无限元法)是应用所制定的半解析解函数,基于变分方程的一种半解析数值方法。尽管各种半解析单元的构成在形式上有很大差别,但方法的原理及其单元的构成步骤则是相雷同的。半解析元法建立的一般步骤,如以直角坐标系的三维弹性动力学问题为例,基本上可有:(1)拟选半解析解函数;(2)确定待求的广义变量(自由度)向量;(3)建立形函数;(4)构造相应的变分泛函;(5)用变分原理列出刚度、质量、载荷等矩阵的基本计算式;(6)计算和求取体内位移、应变、应力和内力的值。半解析数值方法采用解析解中最为关键的两种解,它们是与控制方程相应的基本解及其通解。

实践已证明,半解析元法基本上同样具有有限元法和无限元法的一系列特点:它对所求解问题的适应性强而应用范围广,可用于分析非匀质、变刚度、非线性,特别是多维问题由于采用了解析函数而收到降维的效果。在计算工作量和程序前、后处理方面都会有很大程度的节约,也易于用以分析诸如无限域、奇异、耦合、相互作用以及扰动场等等复杂工程问题。当然,它在对几何形状的适应性以及所编程序的通用性与统一性方面似尚有所欠缺。显然,在半解析元法中通过部分采用解析解或多数是人为选取上述的解析函数的手段来达到减少数值计算的维数以及压缩编制庞大、繁复的程序工作量;一方面又通过沿用在一个或两个方向仍作数值离散的手段来弥补人为地采取解析函数带来计算精度上的不足,以尽可能地逼近真实解,这就是半解析元法的优势和特色。

在岩土力学与地下结构方面,半解析元法有着十分广泛的应用。诸如,对岩土介质的静、动态分析,物理非线性问题,地下结构与岩土介质间的相互作用,非匀质地基,上部结构—刚、柔性基础—地基的共同作用,群桩和筏基,流体介质与流固耦合,路面与路基,以及海洋、离岸与近岸工程、水工结构,地下铁道盾构法掘进施工模拟及其管片衬砌结构分析计算等等都是。所有这些,一些年来在国内外和我们学科组都已有一定的研究成果和研制的程序软件可供工程应用。

3.2 分形块体力学法⁽⁹⁾

在脆硬性地层中,岩体被分形结构面切割成各种类型的空间分形块体。在自然状态下,这些空间分形块体处于静力平衡状态;当工程开挖以后,一些分形块体失去了原有的静力平衡,有可能顺沿分形结构面滑移、转动或塌落,导致局部掉块,进而产生连锁反应造成一定程度的塌方或滑坡,也就是在一定范围内的岩体局部失稳。此处仿同块体理论所述,对首先失稳的分形块称为“关键分形块体”,建立分形块体理论的目的即要求找出所有潜在的关键分形块体,探讨在岩体原生裂隙、卸荷裂隙和爆破裂隙(后两者均为因开挖施工引起的)三者以及地下水渗流的共同作用下,对这些关键分形块体稳定性的不利影响。这里,岩体分形结构面属一种不规则面,它贯穿所研究的岩体,将岩体切割成独立的分形块体。对于具体工程言,各组分形结构面认为常具有确定的宏观表征产状,可由现场地质测量或通过相应的简化计算手段来获得。为了找出关键分形块,要求先从几何学和力学的角度对各种不同的分形块体进行分类(如有限和无限、可动和不

可动、稳定和可能失稳,等等)。在分形几何空间内将各组岩体分形结构面和开挖临空分形面作平移,通过坐标原点构成分形块体锥,它是一系列以坐标原点为顶点的分形几何体。按其性质可分为:分形裂隙锥、分形开挖锥、分形空间锥和分形块体锥,等等。借助于分形块体锥的概念,可以得到建立在分形空间内的分形块体有限性与可动性法则。根据制定的判别准则,并确定了所有分形块体的有限性和可动性以后,即可通过块体运动学分析和确定不同分形块体的运动形式,判定各个不同关键分形块体的稳定或失稳性态。对分形块体进行运动学分析时,采用矢量运算和赤平投影法,将赤平投影图解析化,进而建立分形块体理论赤平解析法。方法简便实用,实践证明其精度较高,易于被工程接受和掌握。该法经过在长江三峡工程永久船闸高边坡岩体局部失稳分析中初步采用,得出了一些有益的结论意见。该法似不失为一种行之有效的数值方法(张子新,1996)。

3.3 非连续变形分析(DDA)法^[10]

工程岩体由于受地质构造应力和深厚覆盖层巨大自重的影响,在整个计算范围内岩体通常都将产生较大的非连续变形与位移,而节理岩体内部不连续块体的变形和错动又会引起整体系统的非连续变形。这种变化了的块体形状及其所在的新位置将相互间产生不同的接触关系,因而也导致了不同的相互作用力,并从而又反过来影响块体系统的结构,使其破坏模式呈现非连续的大变形性质。此处所述的非连续变形分析法正是克服了早年块体理论如上的种种不足,而特别适合于模拟岩体上述行为的一种数值方法。

上述非连续变形分析的独特性质似可归结为:(1)完备的运动学理论及其数值实现;(2)高阶多项式的块体位移模式;(3)严格的平衡假定;(4)系统最小势能原理的正确采用和高效的数值计算。顺带说一下,尽管早年建立的无厚度节理单元或接触单元法(Goodman,1968)和夹层单元法(Desai,1984)被认为是处理非连续岩体技术上的一大进步,但它们因受到各自固有缺陷制约而使实用上存在许多限制与不便,特别是仅限于小位移和小转角模式,且不适用于初始松散体系与失稳后的性态模拟,以及仍不能有效解决非连续的大变形和大位移问题。众所周知,后者所述的破坏模式比仍沿用连续介质力学方法来描述的更为敏感,其破坏性也更大。

非连续变形分析的计算特色可以概括下面9点:(1)块体是由节理面切割而围成,形成几何上十分复杂的多面体和多边形,而单个块体单元不需切割为无限小;(2)满足力的平衡方程和块体内部满足变形协调方程,但块体外部不满足变形协调,其本构关系亦与有限元的不同,单元块体之间可以滑移、转动、张开和闭合;(3)块体单元之间可以分离,但不能嵌入和拉伸,作用力从接触点处传递;(4)每一块体可有一种位移模式,因而块体任一点的位移都可求得;(5)块体位移模式与其块体形状有关,当块体形状复杂时,任一块体仍可用一套变形参数来描述;(6)采用隐式计算,由系统最小势能原理建立和求解总体平衡方程组,它归属为位移法,其位移模式与有限元法相同;(7)方程组求解时视位移为未知量,不存在收敛性问题,视外部条件不同可以分别作静、动态分析计算;(8)位移既是单元体内任一点的值,也可能是块体间接触处的位移;(9)可处理十分复杂的块体界面接触关系以及多个块体间的任意性接触。

我学科研究组已将非连续变形分析推广到三维岩石力学与工程问题(王如路,1996),二维程序已在三峡工程高边坡岩体的变形与稳定研究中得到了初步的成功应用。

3.4 非线性大变形问题有限差分(FLAC)法

FLAC是Fast Lagrangian Analysis of Code的缩写,可译为连续介质快速拉格朗日分析,它由美国I-TASCA咨询集团于1986年研制推出。FLAC是一种显式有限差分程序。众所周知,有限差分并不局限于矩形网格,1964年Wilkins首先推演了任意形状单元差分方程的方法。FLAC采用了这一方法,使便于模拟具有任意复杂边界的问题。它与有限单元法的不同处还反映在:其网格分别为物理网格和数学网格,且互为映射,所划分的网格只要有序可以任选不规则的形状。FLAC在其数字计算格式中采用的是动力方程,其目的是确保当所模拟的物理系统为不稳定时,数字计算策略仍然是稳定的。这就使FLAC程序极适