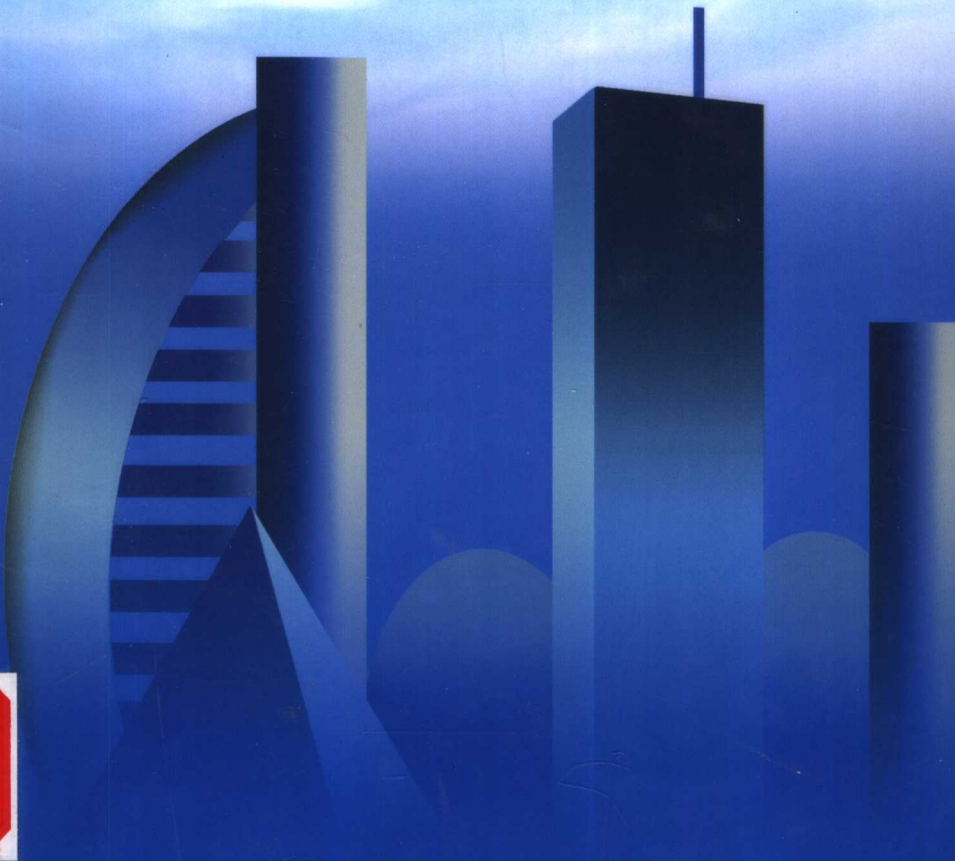


高等学校工程管理课程系列教材

岩土工程数值分析新方法

傅鹤林 彭思甜 韩汝才 何贤锋 编著

华祖焜 主审



中南大学出版社

高等学校工程管理课程系列教材

-37

岩土工程数值分析新方法

傅鹤林 彭思甜 编著
韩汝才 何贤锋
华祖焜 主审

中南大学出版社

图书在版编目(CIP)数据

岩土工程数值分析新方法/傅鹤林等编著. —长沙:
中南大学出版社, 2006. 3
ISBN 7-81105-277-6

I. 岩... II. 傅... III. 岩土工程—数值计算 IV. TU4

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2006)第 013094 号

岩土工程数值分析新方法

编 著 傅鹤林 彭思甜
韩汝才 何贤锋

☐责任编辑 邓立荣

☐责任印制 文桂武

☐出版发行 中南大学出版社

社址:长沙市麓山南路

邮编:410083

发行科电话:0731-8876770

传真:0731-8710482

☐印 装 中南大学印刷厂

☐开 本 730×960 1/16 ☐印张 15.75 ☐字数 284 千字

☐版 次 2006 年 3 月第 1 版 ☐2006 年 3 月第 1 次印刷

☐书 号 ISBN 7-81105-277-6/N·002

☐定 价 28.00 元

图书出现印装问题,请与出版社调换

前 言

随着科学技术的不断进步,出现越来越多的交叉学科。学科的交叉带动了岩土工程学科的飞速发展。其中工程数学在岩土工程中的应用,解决了许多工程中以前无法解决的难题,而且呈现出应用范围越来越广的趋势。但是目前,尚缺乏一本系统全面介绍系列工程数学在岩土工程应用的专著。本书就是在此背景下出版的,并且取名“岩土工程数值分析新方法”。本书的初稿曾作为岩土工程专业和道路与铁道工程及部分隧道工程博士研究生的教材,正稿在讲义的基础上进行了加工整理而成。本书主要介绍新近出现的灰色理论、模糊理论、突变理论、遗传算法、蚁群理论、人工神经网络、块体理论、分形理论、时间序列、蒙特卡洛等方法的基本原理及其在岩土工程中的应用,力求为岩土学科的工作者提供有益的参考。

本书由傅鹤林、彭思甜、韩汝才和何贤锋编著,华祖焜审阅。书中融入了作者的最新研究成果。此书适合于公路交通、铁道、水电、市政、冶金、矿山、国防等部门从事岩土工程设计和研究的技术人员、研究生和高年级本科生使用。

中国工程院刘宝琛院士和李亮教授对此书的编写提供了十分重要的指导意见。博士生董辉、周中、王志斌、邓宗伟、匡乐红、张学民、聂志宏、万智、贺若兰、牛建东、田卿燕及硕士生张卫国、周宁、郭建峰、刘金松等帮助查阅了大量资料并做了大量文字整理方面的工作。笔者在此一并致以深切谢意。

本书参考文献很多,有些文献未能一一列出,在此谨向这些文献的作者表示感谢。

此外,本书还得到交通部西部项目“西部地区公路地质灾害监测预报技术研究”(编号:200331880201)的帮助,在此表示感谢。

由于作者水平有限,加上时间仓促,书中难免有欠缺、不妥甚至谬误之处,恳请各位专家、学者和广大读者提出批评指正。

2005 年 11 月于长沙

目 录

第1章 绪 论	(1)
1.1 岩土基本性质的试验研究	(1)
1.2 岩土力学本构理论研究	(2)
1.3 岩土力学计算方法研究	(2)
1.4 岩土流变力学研究	(3)
1.5 岩土损伤、断裂力学研究	(4)
1.6 分形岩土力学研究	(5)
1.7 岩土渗流及环境岩土力学	(5)
1.8 智能科学方法在岩土力学问题中的应用	(6)
1.9 计算机新技术在岩土力学中的应用	(7)
第2章 灰色理论及其在岩土工程中的应用	(8)
2.1 灰色系统理论简介	(8)
2.2 灰色理论在岩土工程中的应用	(21)
第3章 突变理论及其在岩土工程中的应用	(36)
3.1 引言	(36)
3.2 突变理论的诞生	(36)
3.3 突变理论体系	(37)
3.4 突变理论在边坡稳定性评价中的应用	(50)
3.5 突变理论在地下工程中的应用	(54)
3.6 突变理论在基坑工程中的应用	(59)
3.7 突变理论在泥石流灾害中的应用	(63)
3.8 总结	(67)

第4章 人工神经网络及其在岩土工程中的应用	(68)
4.1 人工神经网络简介	(68)
4.2 神经元模型	(72)
4.3 人工神经网络在岩土工程中的应用	(79)
第5章 蚁群算法及其在岩土工程中的应用	(104)
5.1 蚁群算法的生物学原理	(104)
5.2 蚁群算法	(105)
5.3 蚁群算法在岩土工程中的应用	(110)
第6章 遗传算法及其在岩土工程中的应用	(117)
6.1 遗传算法简介	(117)
6.2 遗传算法的基本特点	(118)
6.3 遗传算法的基本操作	(119)
6.4 遗传算法的设计步骤	(122)
6.5 遗传算法的实质	(124)
6.6 遗传算法的应用情况	(125)
6.7 遗传算法在岩土工程中的应用	(127)
6.8 计算实例	(138)
6.9 结语	(139)
6.10 基于遗传算法的岩土本构模型辨识	(140)
第7章 岩质边坡稳定性的结构分析	(145)
7.1 本章概述	(145)
7.2 块体理论的岩体结构分析	(145)
7.3 应用块体理论分析岩体边坡稳定性	(155)
7.4 块裂岩体边坡剪切破坏形式分析	(157)
7.5 本章结论	(162)
第8章 岩土工程领域时间序列的方法研究及应用	(164)
8.1 概述	(164)
8.2 时间序列研究方法的现状	(167)
8.3 时间序列与随机过程	(170)

8.4	岩土工程领域中的时间序列研究的常用方法	(171)
8.5	建立时间序列模型的基本思想	(174)
8.6	时间序列的动态特性	(175)
8.7	时间序列方法在岩土工程中的应用	(177)
8.8	存在的问题及展望	(186)
第9章	分形几何及其在岩土工程中的应用	(187)
9.1	分形几何的基本概念	(187)
9.2	分形几何的若干方面	(188)
9.3	膨胀土结构分形特征研究	(199)
第10章	模糊优选的理论与方法	(204)
10.1	层次分析法(AHP)的基本原理与应用步骤	(204)
10.2	模糊优选理论的数学基础	(209)
10.3	隶属函数(度)的确定方法	(212)
10.4	权重的确定方法	(220)
10.5	模糊优选理论模型的建立与意义	(223)
10.6	模糊优选的特点和方法	(225)
10.7	本章小结	(226)
第11章	蒙特卡洛方法的若干应用	(227)
11.1	蒙特卡洛方法简介	(227)
11.2	用引入模糊示性函数的蒙特卡洛方法计算结构的失效概率	(228)
11.3	盾构法隧道施工影响地表变形的随机因素分析	(233)
	参考文献	(240)

第1章 绪论

岩土力学与工程在我国有着长期的发展历史。著名的都江堰水利工程和闻名全球、被誉为世界八大奇观之一的万里长城以及由北京直达杭州的古老运河等都是具有代表性的杰作。在当时,先辈们凭借丰富的实践经验设计施工,还没有建立岩土力学的概念。新中国成立以后,我国的经济建设事业取得了很大的成就,同时,也遇到了许多与工程地质及岩土力学密切相关的技术难题。如特殊的区域性构造地质、松散破碎复杂岩基、高地应力作用下的软岩、大跨洞室围岩的大变形、水工隧洞群之间的相互受力作用、高陡边坡的持续稳定、岩土体内的不稳态渗流,以及“三下”(铁路下、水下和建筑物下)采煤等工程建设中遇到的十分突出的问题。交通、能源、水利水电与采矿工业各个经济领域的需要对我国岩土力学与工程学科的发展起到了有力的促进作用。从20世纪50年代末开始,中国有历史意义的大型水利水电工程设计勘测大规模展开,为岩土力学的试验和理论研究以及实际的工程应用注入了巨大的活力。20世纪80年代末,中国政府决定正式兴建长江三峡工程,更大量的岩土力学与工程问题摆在中国专家、学者们的面前,如长达6 km,坡高最大达170 m的永久船闸高边坡岩体开挖,其整体稳定性与变形机制、岩体流变与地下水渗流等极为复杂多变的岩土力学课题。21世纪初,中国高速公路和高速铁路的快速建设及城镇化建设的快速兴起,各种岩土力学问题摆在岩土工作者面前。所以,当前中国的岩土力学专家们具有重大的机遇,也面临着严峻的挑战。如何正确地解决好这些问题,也推动着岩土工程学科与工程技术的进步和持续发展。

1.1 岩土基本性质的试验研究

岩土试验是岩土力学的基础,是研究岩土力学与工程的重要手段之一。在中国,随着试验设备和手段的提高,岩土力学的试验水平有了较大的发展。特别是常规的岩土力学试验发展很快,如单轴拉伸、压缩试验、三轴压缩试验、岩土流变试验、离心试验、振动试验台、伺服试验等。近年来,随着大批重大岩土工程建设的需要,对岩土力学特性试验提出了更高的要求,进行了若干非常规的岩土力学特性试验研究。例如:利用高倍扫描电镜对岩石的细观时效损

伤特性和损伤力学行为进行细观试验分析;岩石损伤力学特性的 CT 试验,膨胀土的电镜试验,复杂应力条件下岩土在开挖卸荷条件下的多轴卸荷破坏试验和岩土抗拉全过程的单轴破坏试验等。

1.2 岩土力学本构理论研究

岩土本构理论是建立岩土力学物理模拟、数值模拟与计算分析的基础,是进行岩土力学理论研究的核心。目前,在宏观唯象学基础上建立起来的岩土弹塑性理论、流变学理论以及损伤力学理论等等,在我国已得到很大发展与完善。其中较有代表性的是沈珠江(1965)、郑颖人(1989)、殷有泉(1990)等对岩土在三维应变空间的屈服面问题的研究,提出了用应变空间表达岩土的本构关系,使岩土的应变软化硬化问题、弹塑性耦合问题都能得到较好的解决。郑颖人、沈珠江(1990)提出了多种屈服面理论,对岩土材料的屈服面用多个屈服面进行表达,给出了弹性与塑性模型耦合关系的数学表达式,并编制了相应的有限元程序。俞茂宏(1985, 1990, 1997)提出了双剪强度理论和统一强度理论,在主应力空间屈服面可表达为封闭的多边形,对于金属材料、混凝土材料和岩土材料能够普遍适用。统一强度理论,已在水电站地下工程设计、岩土地基计算等工程中得到较好的应用。

1.3 岩土力学计算方法研究

近 30 年来,岩土力学数值计算方法得到了迅速发展,出现了有限差分、有限元、边界元、离散元、块体元、无限元、流形元及其混合应用等各种数值模拟技术,使复杂岩土工程的设计计算发生了很大的变化。岩土力学计算不仅已基本上取代了传统线弹性力学实验,而且也在岩土工程非线性实验中显示出极大的优势。值得指出的是,在中国,有限元数值计算方法已不仅仅由线性发展到高度非线性和大变形问题,由二维发展到三维;同时,还可以考虑粘性流变、渗流与应力场耦合、损伤、断裂以及动力效应。国内出现了一些享有声誉的有限元程序,如北京大学的 NOLM283,清华大学的 TFNE,西安科技学院的 NCAP22D 程序,同济大学的启明星软件、理正软件等,这些程序均在许多大型岩土工程中得到了良好应用。从国外引进的大岩土工程计算软件,如 FNIAL 程序、Ansys 软件、Flac 软件、Phase 软件、Adina 软件、UDEC 软件、3D- σ 、2D- σ 等近年来结合中国的实际,在许多工程中得到了良好的应用。不同数值计算方法的结合,更能发挥各种数值方法优势互补的作用。如有限元-边界元的混合、有限元-离散元的混合、有限元-无限元和有限元-块体元的混合采用等。无限域单元的应用不仅使有限元计算规模得以减小,并且可以避免人为的

边界约束效应,特别是在求解岩土动力问题的边界效应方面更加显示出它的优越性。此外,合理确定岩土力学性态的有关参数是数值计算结果可靠性与否的关键。然而,由于岩土体性态十分复杂以及受地质条件的影响,使得计算参数的取值问题变得十分困难。这是至今数值分析手段仍不能为工程设计和工程决策提供可靠依据的重要原因。反演分析正是为克服求解岩土体原始参数而出现的一种新方法。中国近年来在反演分析方面进行了大量的研究工作,已由简单的线弹性反演问题发展到非线性、粘-弹-塑性反分析,从单一的毛洞围岩到考虑支护结构体系的反演,从有限元位移反演到边界元位移反演,从确定性反演到非确定性随机反演等等。反分析的目的已不仅仅是为了得到模型参数,更重要的是要应用这些参数,进行相应的时间序列值分析以及从参数估计发展到模型识别进而建立新的模型,以便对工程效果做出更合理的评价与有依据的预测。从这一重要的目的来说,考虑时间效应的粘-弹-塑性位移反演分析具有更好的实用价值。现场监测—反演分析—工程实践检验—正演分析及预测,这样一个完整的循环系统,对岩土力学与工程设计和施工来说被认为是一种行之有效的有效的手段。这方面,杨志法(1986),王芝银、刘怀恒(1988),孙钧、杨林德(1990),傅鹤林(1997)等人的研究在国内具有代表性。已在水电站地下厂房、铁路隧道、矿山井巷、岩坡、坝基、基坑等岩土工程中得到了不少应用。

1.4 岩土流变力学研究

中国地域辽阔,不同地区的岩土其基本力学特性有很大的差别。岩土的流变与粘性变形时效是与其力学效应相辅相成的。在软岩、极软岩、软土、节理裂隙发育或高地应力条件下,这种粘性变形时效就更为明显,成为工程设计计算中须考虑的主要因素。中国学者在岩土材料流变学的研究方面虽然起步比较晚,但发展较快,这主要是客观上大规模岩土工程建设需要的促进。早在20世纪80年代初,同济大学研制了RV284岩体弱面剪切流变仪(1982),它结合若干软岩地区水上隧洞、地下厂房和矿山井巷工程进行流变试验研究,不仅对完整岩块,而且对岩石节理的剪切流变效应作了分析探讨。武汉水利电力大学研制了RYS27型岩石三轴流变仪(1982),中国科学院地球物理研究所研制了多功能高温高压条件下的岩石三轴流变仪(1985)等等,这些都是其代表。这些试验设备的研制和应用大大促进了岩石流变力学在中国的发展。在不太长的时间内,连续研制出一批高性能的岩石三轴和直剪流变仪,这在国际上也属少见。但是,如何将这些实验成果在工程中推广应用,是进一步努力的方向。在岩土流变学理论与应用方面也进行了不少研究工作。已故的陈宗基教授在中国率先建立了岩土流变的扩容方程(1981),其特点是不仅考虑一般的蠕变,而且考虑

其扩容变形也随时间增长而发展;并将这一理论应用于矿山井巷围岩稳定性评价以及岩爆和地理方面的研究。孙钧(1984)结合一些水电站地下厂房围岩流变研究,对岩块、节理和软弱夹层以及断裂破碎带的非线性流变特性分别进行了深入细致的研究。最近,又结合有限元数值方法,研制了真三维粘-弹-塑有限元非线性数值分析程序软件,用于三峡工程永久船闸高边坡开挖施工全过程三维数值模拟,取得了良好的社会效益和经济效益。目前武汉岩土力学研究所着手研究石油储备条件下岩土体的流变性能。铁通科学研究院正着手研究京沪高速软土路基的流变性能问题。

1.5 岩土损伤、断裂力学研究

岩土材料是一种自然地质体,其内部各种节理、裂隙和微缺陷的存在是不可避免的。损伤力学的发展为合理考虑岩石材料各种分布缺陷的研究提供了有力的手段。20世纪80年代末,损伤力学在岩土力学中的应用在国内受到极大的关注。周维垣(1985)首先将损伤力学应用于二滩拱坝坝肩稳定性分析,进行了岩体损伤裂隙的统计,得出了损伤裂隙分布模型,并由此定义出损伤张量,进而引入有限元计算;近些年,又在大型有限元数值分析软件 TENE 中引入损伤力学,包括线弹性和弹塑性损伤模型,并进行了一些大坝体的稳定计算,如二滩、李家峡、东风和拉西瓦拱坝等等。谢和平(1987)将岩石粘弹塑性非线性大变形有限元计算与损伤力学相结合,在矿山地下开采、地表沉陷、路基稳定性分析方面得到了一定的应用。岩石损伤力学的重点是建立损伤变量(张量)和损伤扩展本构关系。这就涉及岩石材料的损伤检测与识别问题。自从 SPRUNT BRACE(1974)将扫描电镜技术引入岩石断裂研究以来,中国学者在这方面进行了大量的研究工作。许江等(1986)采用带有加载装置的光学显微镜进行了砂岩在不同加载阶段的损伤裂纹分析;谢和平(1989)对岩石在各种加载条件下破坏断口进行分析;孙钧(1992)、赵永红(1993)分别采用带有微型加载装置的扫描电镜对岩石的微损伤扩展进行研究,并用于三峡船闸高边坡闪云斜长花岗岩的损伤扩展分析(1997)。这些研究有力地推动了岩体损伤力学的发展,特别是对岩石损伤机理的解释方面起到了积极作用。近年来,孙钧(1996, 1997, 1998)在岩石损伤的 CT 识别方面进行了较深入的研究^[11]。CT 识别岩石损伤不但可以无扰动岩样损伤检测,更重要的是通过 CT 图像、CT 数大小和 CT 数量与岩石损伤变量和损伤扩展联系起来,为建立岩石损伤扩展本构关系奠定了基础。孙钧(1998)还将这一技术应用于三峡船闸高边坡闪云斜长花岗岩的损伤检测。

1.6 分形岩土力学研究

分形几何自 20 世纪 80 年代初形成以来,在岩石力学领域得到了不同程度的应用,过去认为难以解释或解决的问题,已有了一些分形研究的新成果。中国学者在这一领域里的研究是令人瞩目的,其中谢和平教授的工作(1987, 1990, 1994, 1996)最具代表性。他在国内最早开设“分形岩石力学”(Fractals Rock Mechanics)课程。并先后赴美国犹他(Utah)大学、英国南安普顿(Southampton)大学、波兰科学院和德国汉诺威大学专门讲授分形岩石力学课程并在国外从事这方面的研究,取得了丰硕的研究成果。以谢和平为代表的在分形岩土力学方面的主要成果为:①岩石节理面的分形研究,包括岩石节理面分形描述以及节理面力学行为和节理断层的分形研究;②岩石损伤演化过程的分形研究;③岩石(煤)破坏度和破碎程度的分形研究;④岩爆的分形研究;⑤岩石渗流过程的分形研究;⑥地震预报过程的分形研究;⑦土体结构分形研究等等。这些研究成果已部分直接或间接地应用于岩土工程实践中,但要完整而理想地应用于工程实际看来还有一个相当长的过程。由于分形几何的小规则性,岩土力学现有的一些现象和力学概念在分形空间中需要重新建立和认识。分形几何是一个工具,最终的目的是用它来揭示岩土力学中的复杂现象,为解决工程问题服务。因此,分形岩土力学的研究似应包括三个层次:第一层次是研究分形岩土力学的数学基础,以及重新认识和建立分形空间中的力学定量和力学定律;第二层次是广泛、系统地探讨岩土力学中的分形行为和分形结构,揭示岩土力学问题中一些复杂现象的分形机理和形成过程,应用分形定量或定性地解释和描述岩土力学中过去只能近似描述仍难以描述的现象和问题;第三层次是将分形岩土力学的理论和研究成果应用到工程,解决生产实际问题,促进工程问题的量化、精确化和可预测性。从目前中国这方面的研究现状看,第二层次的研究成为热点所在,并取得了一些阶段性成果。如何将分形的研究成果进一步应用于实际工程是当前国内岩土力学工作者正在努力的方向。

1.7 岩土渗流及环境岩土力学

天然岩土体并非是单一固相介质,而是赋存有固相、液相和气相,并呈相互作用的三相介质体。中国在这方面的研究起步较晚,但已取得了很大进步。把岩土学的应力-渗流耦合分析应用到水库诱发地震的预测研究上(陶震宁, 1988),得到了一些有意义的结果。赵阳升(1993)针对矿山岩石力学特点,建立了煤体-瓦斯耦合的力学模型,并对冲击地压与瓦斯突出的统一失稳理论进行了研究,在矿山工程中取得了初步成功。环境岩土力学是近年来新发展起来

的一个分支。研究自然高边坡持续稳定和与地质(如泥石流危险性预报)、地震灾害有关的岩土力学问题、城市垃圾场填埋问题是环境岩土力学的重要课题。近年来,长江三峡工程坝区的库岸稳定以及三峡移民新迁县城的新址岩基稳定研究工作已有一定的成果(崔政权,1991)。城市垃圾场填埋问题国内研究已有起步,虽然成熟的成果不多,但发展潜力很大,还需岩土力学专家和同行们继续努力。

1.8 智能科学方法在岩土力学问题中的应用

岩土的力学性质是如此复杂,在实际的岩土工程中,依靠人们实践经验进行技术决策的方法仍然起到相当重要的作用。自20世纪70年代以来,计算机科学中的人工智能技术在中国进入了实用阶段。中国自1949年以来,进行了大规模的工程建设,积累了大量的实践经验,把这些经验利用人工智能方法使其更好地发挥作用,无疑对中国的岩土工程是一笔宝贵的财富。首先在中国发展起来的是人工智能专家系统。在岩土力学与工程方面,国内最早的专家系统是用于岩体分类(张清,1988),随后,针对不同的技术问题研制了相应的专家系统。例如,隧道及地下结构岩溶灾害预报专家系统(张清,1993)、采矿巷道围岩设计专家系统(林韵梅等,1992)等等。这些专家系统是以产生式规则组成的知识库,以及对于处理不精确问题采用上述的模糊推理或概率统计方法。有关岩土力学在这方面的专著也相应出版(林韵梅,1993;李效甫,1993)。采矿界的于学馥先生更是强调了信息时代的岩石力学问题(1994,1995)。

人工神经网络(Artificial Neural Network)是模拟人脑学习功能的一种智能技术,人们发现它可以用于预测。于是人工神经网络开始引入岩土力学与工程(张清,1991),随后把这一方法用于岩土力学行为预测和巷道分类指标聚类分析,近年来又把它应用于岩土工程系统和工程参数重要性分析。20世纪90年代中期,一种称为“实例类比系统(Case based Reasoning System)”在中国亦被引入岩石工程(张清,1995),它可以充分利用已建成的工程实例(case)的经验,指导今后的设计与施工。鉴于人工智能在岩石力学中的发展,有的学者还提出了建立“智能岩石力学(Intelligent Rock Mechanics)”的设想(冯夏庭,1994)。此外,为了处理岩土力学中的不确定性,模糊数学、概率统计、灰色系统等理论也直接被引用到岩土力学中来。早在1981年,模糊数学即用来解决岩土分类问题。此外,如岩体节理的模糊抗剪强度、岩层质量控制的模糊表达和地下工程支护方案模糊决策研究等都取得了阶段性成果。概率统计除用于岩土工程可靠度分析外,还发展了用Markov(傅鹤林,1996;阳吉宝,1997)进行地质预报和利用时间序列分析预报岩土力学行为。

灰色系统(Grey System)是邓聚龙(1981)创建的一种软科学理论,已广泛应用于规划、预测、控制和决策等方面。20世纪80年代末,中国开始引入岩土工程,用于岩土力学时空延拓分析、边坡位移的预测、桩基承载力预测等。

1.9 计算机新技术在岩土力学中的应用

计算机多媒体技术的发展为岩土力学与工程的可视化处理提供了新的手段。近年来,中国的计算机技术发展速度很快。将计算机可视化技术与三维动画仿真图形显示有机结合,能生动、直观而又逼真地体现各施工过程的三维动态场景,为工程技术决策提供确切依据,并用于指导基于计算机技术的工程施工组织管理系统。这种方法以多媒体为代表,具有集音响、图形、图像和文字三位一体的三维动画景观的特色,给予了人们思维方式和设计观念上的巨大变革。这样,使得在重大岩土工程实际施工之前,就能迅速而又精确地观察到所拟采取的工程措施将会产生的结果,并进而对不同施工方案作出更直接的对比分析,为正确的工程决策提供有力的支持,最终将有望建立全面高效的工程管理系统(EMS),并对工程进行总体模拟,进而加深对整体工程宏观上的综合评价与控制。我们相信,与GIS结合的计算机新技术将会在岩土力学与工程中发挥更大的作用。

本书主要介绍新近出现的灰色理论、模糊理论、突变理论、遗传算法、蚁群理论、人工神经网络、块体理论、分形理论、时间序列、蒙特卡洛等方法的基本原理及其在岩土工程中的应用,力求为岩土学科的工作者提供有益的参考。

第2章 灰色理论及其在岩土工程中的应用

2.1 灰色系统理论简介

2.1.1 灰色系统概述

2.1.1.1 灰色系统理论产生的科学背景

现代科学技术在高度分化的基础上又呈现了高度综合的大趋势,导致了具有方法论意义的系统科学学科群的出现。系统科学揭示了事物之间更为深刻、更具本质性的内在联系,大大促进了科学技术的整体化进程;许多科学领域中长期难以解决的复杂问题随着系统科学的出现迎刃而解;人们对自然界和客观事物演化规律的认识也由于系统科学的出现而逐步深化。20世纪40年代末诞生的系统论、信息论、控制论,产生于20世纪60年代末、70年代初的耗散结构理论、协同论、突变论、分形理论以及70年代中后期相继出现的超循环理论、动力系统理论、泛系理论等都是具有横向性、交叉性的系统科学的新学科。

在系统研究中,由于内外扰动的存在和认识水平的局限,人们所得到的信息往往带有某种不确定性。随着科学技术的发展和人类社会的进步,人们对各类系统不确定性的认识逐步深化,不确定性系统的研究也日益深入。20世纪后半叶,在系统科学和系统工程领域,各种不确定性系统理论和方法的不断涌现形成一大景观。如札德(L. A. Zadeh)教授于20世纪60年代创立的模糊数学,邓聚龙教授于80年代创立的灰色系统理论,帕拉克(Z. Pawlak)教授于80年代创立的粗糙集理论(Rough Sets Theory)和王光远教授于90年代创立的未确知数学等,都是不确定性系统研究的重要成果。这些成果从不同角度、不同侧面论述了处理各类不确定性信息的理论和方法。

2.1.1.2 灰色系统的有关概念和灰色系统理论的主要研究内容

1. 灰色系统的概念及主要研究内容

灰色分析全名为灰色系统理论(Grey System Theory),是由中国邓聚龙教授于1982年在国际经济学会议上提出的。该理论主要是针对系统模型之不明确

性、信息之不完整性之下,进行关于系统的关联分析(Relational Analysis)、模型建构(Constructing A Model),借助预测(Prediction)及决策(Decision)的方法来探讨及了解系统。灰色系统理论以“部分信息已知,部分信息未知”的“小样本”、“贫信息”不确定性系统为研究对象,主要通过对“部分”已知信息的生成、开发,提取有价值的信息,实现对系统运行行为、演化规律的正确描述和有效监控。社会、经济、农业、工业、生态、生物等许多系统,是按照研究对象所属的领域和范围命名的,而灰色系统则是按颜色命名的。在控制论中,人们常用颜色的深浅形容信息的明确程度,如艾什比(Ashby)将内部信息未知的对象称为黑箱(Black Box),这种称谓已为人们普遍接受。我们用“黑”表示信息未知,用“白”表示信息完全明确,用“灰”表示部分信息明确、部分信息不明确。相应地,信息完全明确的系统称为白色系统,信息未知的系统称为黑色系统,部分信息明确、部分信息不明确的系统称为灰色系统。

灰色系统理论是研究灰色系统分析、建模、预测、决策和控制的理论。它把一般系统论、信息论及控制论的观点和方法延伸到社会、经济和生态等抽象系统,并结合数学方法,发展出一套解决信息不完全系统(灰色系统)的理论和方法。

灰色系统理论分析具有沟通社会科学及自然科学的作用,可将抽象的系统加以实体化、量化、模型化及最佳化。

人们在社会、经济活动或科学研究过程中,经常会遇到信息不完全的情形。如在农业生产中,即使播种面积、种子、化肥、灌溉条件等信息完全明确,但由于劳动力技术水平、自然环境、气候条件、市场行情等信息不明确,仍然难以准确地预测出产量、产值。再如生物防治系统,虽然害虫与其天敌之间的关系十分明确,但却往往因为人们对害虫与饵料、天敌与饵料、某一天敌与别的天敌、某一害虫与别的害虫之间的关联信息了解不够,使得生物防治难以达到预期效果。价格体系的调整或改革,常常因为缺乏民众心理承受力的信息,以及某些商品价格变动对其他商品价格影响的确切信息而步履维艰。在证券市场上,即使是最高明的系统分析人员亦难以稳操胜券,也测不准金融政策、企业改革、国际市场和政治风云变化以及某些板块价格波动对其他板块之影响的确切信息;一般社会经济系统,由于其没有明确的“内”、“外”关系,系统本身与系统环境、系统内部与系统外部的边界若明若暗,难以分析输入(投入)对输出(产出)的影响。同一个经济变量,有的研究者将它视为内生变量,另一些研究者却把它视为外生变量,这是因为缺乏系统结构、系统模型及系统功能信息。

2. 灰色系统理论的框架及主要内容

灰色系统理论经过 20 多年的发展,已基本建立起一套完整的学科结构体系。其主要内容包括以灰色朦胧集为基础的理论体系,以灰色关联空间为依托的分析体系,以灰色序列生成为基础的方法体系,以灰色模型(GM)为核心的模型体系,以系统分析、评估、建模、预测、决策、控制、优化为主体的技术体系。灰色朦胧集、灰色代数系统、灰色方程、灰色矩阵等是灰色系统理论的基础,从学科体系自身的优美、完善出发,这里有许多问题值得进一步研究。灰色系统分析除灰色关联分析外,还包括灰色聚类和灰色统计评估等内容。灰色序列生成通过序列算子的作用来实现,序列算子主要包括缓冲算子(弱化算子、强化算子)、均值生成算子、级比生成算子、累加生成算子和累减生成算子等。灰色模型按照五步建模思想构建,通过灰色生成或序列算子的作用弱化随机性,挖掘潜在规律,经过灰色差分方程与灰色微分方程之间的互换实现了利用离散的数据序列建立连续的动态微分方程的新飞跃。灰色预测是基于 GM 模型作出的定量预测,按照其功能和特征可分为数列预测、区间预测、灾变预测、季节灾变预测、波形预测和系统预测等几种类型。灰色决策包括灰靶决策、灰色关联决策、灰色统计、聚类决策、灰色局势决策和灰色层次决策等。灰色控制的主要内容包括本征性灰色系统的控制问题和以灰色系统方法为基础构成的控制,如灰色关联控制和 GM(1,1) 预测控制等。灰色优化技术包括灰色线性规划、灰色非线性规划、灰色整数规划和灰色动态规划等。

2.1.1.3 几种不确定性方法的比较

概率统计、模糊数学和灰色系统理论是三种最常用的不确定性系统研究方法。其研究对象都具有某种不确定性,这是三者的共同点。正是研究对象在不确定性上的区别,派生出三种各具特色的不确定性学科。

模糊数学着重研究“认知不确定”问题,其研究对象具有“内涵明确,外延不明确”的特点。比如“年轻人”就是一个模糊概念。因为每一个人都十分清楚“年轻人”的内涵。但是要让你划定一个确切的范围,在这个范围之内的是年轻人,范围之外的都不是年轻人,则很难办到。因为年轻人这个概念外延不明确。对于这类内涵明确、外延不明确的“认知不确定”问题,模糊数学主要是凭经验借助于隶属函数进行处理。

概率统计研究的是“随机不确定”现象,着重于考察“随机不确定”现象的历史统计规律,考察具有多种可能发生的结果之“随机不确定”现象中每一种结果发生的可能性大小。其出发点是大样本,并要求对象服从某种典型分布。

灰色系统理论着重研究概率统计、模糊数学所难以解决的“小样本”、“贫信息”不确定性问题,并依据信息覆盖,通过序列算子的作用探索事物运动的