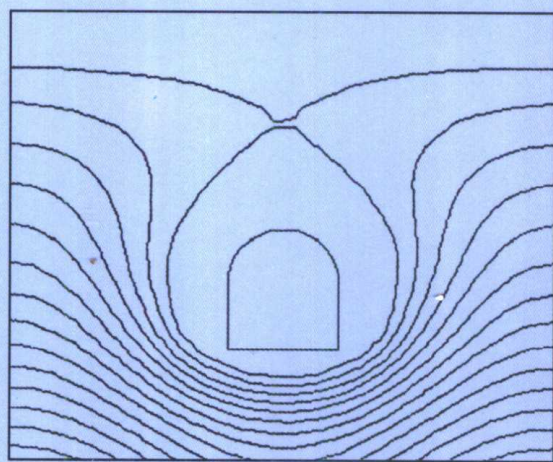


工程勘察设计系列丛书

# 工程地质数值模拟的理论与方法

唐辉明 晏鄂川 胡新丽 编著



中国地质大学出版社

# 工程地质数值模拟的理论与方法

唐辉明 晏鄂川 胡新丽 编著

中国地质大学出版社

## 内 容 简 介

本书系统地介绍了工程地质数值法的基本理论和方法,较充分地反映了作者及国内外最新研究成果。全书共分为两篇十八章。第一篇为工程地质数值模拟的理论,包括概论、基础知识、线弹性有限单元法、非线性有限单元法、流变问题的有限单元法、离散单元法、边界单元法、快速拉格朗日分析、不连续变形分析、数值流形元法和数值方法的耦合。第二篇为工程地质数值模拟的应用,包括不连续面的模拟、卸荷加载模拟、断裂扩展模拟、损伤模拟、反分析理论、渗流场模拟和固液两相耦合分析。

本书体系合理、理论严谨、内容丰富全面,深入浅出,实用性强,可供土木工程、岩土工程、工程地质、地质工程、水利工程、环境工程的专业人员使用,还可作为以上专业本科生和研究生的教学参考书。

## 图书在版编目(CIP)数据

工程地质数值模拟的理论与方法/唐辉明,晏鄂川,胡新丽编著. —武汉:中国地质大学出版社,2001.10

ISBN 7-5625-1654-5

I. 工…

II. ①唐…②晏…③胡…

III. 工程数学-理论-应用

IV. TB115

工程地质数值模拟的理论与方法

唐辉明 晏鄂川 胡新丽 编著

丛书策划:梁志 赵来时 责任编辑:徐润英 技术编辑:阮一飞 责任校对:胡义珍

出版发行:中国地质大学出版社(武汉市洪山区鲁磨路31号) 邮编:430074

电话:(027) 87483101 传真:87481537 E-mail: cbo@cug.edu.cn

经 销:全国新华书店

开本:787毫米×1092毫米 1/16

字数:600千字 印张:23.625

版次:2001年10月第1版

印次:2002年7月第2次印刷

印刷:中国地质大学出版社印刷厂

印数:3 001—4 500册

ISBN 7-5625-1654-5/TB·5

定价:45.00元

如有印装质量问题请与印刷厂联系调换

# 《工程勘察设计系列丛书》编辑委员会

主 编：唐辉明

副 主 编：苏爱军、廖声银

编委会成员（以姓氏笔画排序）：

万军伟	王 晋	方 云	乌效鸣	孙仁先	刘昌辉
刘佑荣	苏爱军	陈建平	陈植华	陈 刚	陈江平
吴 立	余宏明	肖诗荣	杨顺安	杨志波	杨银湖
孟高头	林 彤	张显苏	赵来时	胡一钢	胡新丽
姚爱国	唐辉明	徐恒力	晏鄂川	殷坤龙	梁 志
梁 杏	程新生	蒋国盛	詹 松	简文星	雷呈斌
靳孟贵	廖声银	谭松林	滕伟福		

# Principles And Applications of Numerical Modeling in Engineering Geology

Tang Huiming, Yan E'chuan & Hu Xinli

## ABSTRACT

Basic theories and methods of numerical modeling in engineering geology are introduced systematically in this book. The new achievements of the research both in theory and application are reflected. This book is separated into 2 scripts and 18 chapters. One script relate the theories of numerical simulation in engineering geology, which include outline, basic knowledge, linear-elastic finite element method, non-linear finite element method, finite element method of rheology, discrete element method, boundary element method, fast lagrangian analysis, discontinuous deformation analysis, manifold method and coupling of numerical method, the other script relate applications of numerical simulation in engineering geology, which include simulation of discontinuities, simulation of loading and unloading, simulation of crack growth, simulation of damage, back-analysis, simulation of seepage field and coupling analysis of the two-phase of solid-liquid.

As the system is reasonable, the theories are preciseness and the contents are abundant, this book is useful to professional engineers of civil engineering, geotechnics, engineering geology, geological engineering and environment engineering. Also, It can be taken for the teaching reference in these majors.

# 前 言

岩土工程及工程地质的主要任务是研究人类赖以生存与发展的地质环境及其有效利用问题，使其更好地为人类服务。改革开放以来，特别是邓小平同志南巡讲话发表以来，我国的工程地质、岩土工程迅速发展，应用日益广泛和深入。一方面，我国基础工程建设日益受到重视，高层与超高层建筑、水利水电、矿山工程、桥梁隧道、港口码头、高速公路、核电站、地铁等大型、特大型工程纷纷上马，全国基础设施建设呈现出一派欣欣向荣的景象；另一方面，随着人们对环境问题的关注和认识的日益深入，尤其是可持续发展观念的逐渐普及，业内广大科技工作者和工程建设者面临的新课题越来越多、越来越复杂，例如软基处理、深基坑开挖、非开挖工程施工、信息化设计与施工、地质环境保护与地质灾害治理问题，等等。这些日益复杂的问题要求科技工作者不仅能够从科学的角度考虑怎么干，而且还必须从经济学的角度去考虑值不值得干，同时还要从环境、伦理道德的角度去考察该不该干，以便工程建设既多快好省、经济合理，又尽可能地减少工程建设给人类可能带来的负面影响，确保工程的长治久安。因此，欣欣向荣的工程建设景象在为我国地质工程、岩土工程等学科的发展提供前所未有的机遇和为业内广大科技工作者施展才干提供广阔舞台的同时，也向学术界和业内人士提出了新的更高的要求和挑战。

工程勘察、岩土工程设计、基础工程施工与管理、工程概预算等是工程建设的重要内容，也是影响工程建设质量、成本、效益等问题的重要方面，已经引起业内各方面人士的广泛关注。目前，尽管市场上与基础工程问题相关的图书已经比较多，但普遍缺乏系统性，能够比较好地满足业内科技工作者从事工程勘察、岩土工程设计、基础工程施工、监理、监测工作实际需要的并不多见。本社过去也曾出版过几套这方面的参考书，并深受读者欢迎。为了满足工程建设的实际需要，本社在总结以往经验的基础上，特邀请著名工程地质、岩土工程专家唐辉明教授组织业内有关专家，在比较系统地调查研究了我国工程勘察、岩土工程设计、基础工程领域的状况后，编写了《工程勘察设计系列丛书》，比较全面而系统地介绍了工程勘察设计及地质环境保护、地质灾害治理等工作所涉及的基本内容、主要技术手段，并有意识地增加了新理论、新技术、新方法和国内外先进经验的应用，力求雅俗共享，实用性与学术性兼顾，既能满足业内人士从事工程勘察、岩土工程设计、基础工程施工、管理等工作的实际需要，也可以作为高等学校相关专业教师、研究生、高年级大学生工作和学习的参考书。

本丛书的作者都是长期从事工程勘察、岩土工程设计、基础工程施工教学、研究、技术开发和生产工作的教授专家，其中大多数人都有在欧美及俄罗斯留学、工作的阅历，都亲自承担或参与了三峡工程、小浪底工程、京珠高速公路等大型国家重点工程建设任务，既具有深厚的理论功底，又具有丰富的工程实践经验，熟悉国内外工程勘察、岩土工程设计、基础工程施工的基本情况，这为编好本丛书提供了保障。

本丛书的主要特色有：①起点高，以我国现行的国家、行业及地区规范、标准、规程为

依据, 比较全面地归纳、总结了国内外工程勘察、岩土工程设计、基础工程施工领域有代表性的新理论、新技术、新方法、新成果和先进的工程管理经验, 比较好地实现了科学性与实用性的统一; ②理论联系实际, 可读性强, 作者们始终紧密结合工程建设实际, 力求把原理、技术、方法、实际应用融为一体, 系统、全面、精炼地把国内外工程勘察、岩土工程设计、基础工程领域有代表性的新理论、新技术、新方法、新成果和先进的工程管理经验介绍给读者, 对业内人士具有较高的参考价值; ③结构合理, 整体构思既充分考虑工程勘察、岩土工程设计、基础工程施工等过程分工的相对独立性, 又注意各环节的关联性, 每一分册既有自己独立的体系, 又与全套丛书的其他册子紧密联系, 共同构成一个大体系。

诚然, 由于本丛书作者的学术经历不同, 反映在各个分册的编写风格上也有所差别。本丛书的编委会不要求全套丛书的编写风格完全统一, 这或许会给读者阅读带来一些不便, 但这种不同风格正是本丛书的另一特色, 兴许能够进一步启发读者的创新思维, 从而增加本丛书的吸引力。

本套丛书主要包括: 《工程地质数值模拟的理论与方法》、《滑坡治理》、《岩石高边坡信息化设计与施工》、《岩土施工》、《岩土工程监测技术》、《地基与基础》、《岩体力学》、《工程地质学》、《土力学》等。

中国地质大学出版社

2002年6月12日

# 目 录

第一章 概论	(1)
--------	-----

## 第一篇 工程地质数值模拟的理论

第二章 基础知识	(6)
第一节 应力与应变	(6)
第二节 常用本构模型	(11)
第三节 大型线性代数方程组的解法	(17)
第四节 高斯求积公式	(21)
第五节 地下水流动定解问题	(22)
第三章 线弹性有限单元法	(27)
第一节 有限单元法的基本原理及步骤	(28)
第二节 连续弹性体模型离散	(35)
第三节 单元类型及位移模式选择	(39)
第四节 单元分析	(54)
第五节 等效节点荷载移置	(68)
第六节 整体分析	(75)
第七节 工程地质应用及实例	(86)
第四章 非线性有限单元法	(94)
第一节 岩(土)体的非线性特性	(94)
第二节 非线性分析的常用方法	(96)
第三节 增量塑性理论简介	(105)
第四节 常用的弹塑性模型及解法	(112)
第五节 拉破坏的非线性分析	(122)
第六节 简例	(125)
第五章 流变问题的有限单元法	(130)
第一节 岩(土)体的流变特性	(130)
第二节 粘弹性问题的有限元分析	(134)
第三节 粘塑性问题的有限元分析	(136)
第四节 粘弹-粘塑性问题的有限元分析	(139)
第五节 应用实例	(141)
第六章 离散单元法	(145)
第一节 概述	(145)
第二节 离散单元法的基本原理	(147)
第三节 运动方程的解法	(149)
第四节 实例	(152)



<b>第七章 边界单元法</b> .....	(159)
第一节 边界单元法的特点与分类.....	(159)
第二节 直接边界单元法简介.....	(161)
第三节 间接边界单元法——虚应力法.....	(163)
<b>第八章 快速拉格朗日分析</b> .....	(169)
第一节 概述.....	(169)
第二节 基本原理.....	(169)
第三节 FLAC 程序简介.....	(172)
第四节 应用实例.....	(173)
<b>第九章 不连续变形分析</b> .....	(181)
第一节 概述.....	(181)
第二节 基本原理.....	(182)
第三节 应用实例.....	(184)
<b>第十章 数值流形元法</b> .....	(191)
第一节 数值流形元法的有限覆盖体系.....	(191)
第二节 二维流形元法的有限元覆盖.....	(193)
第三节 有限元覆盖体系控制方程的形成.....	(198)
<b>第十一章 数值方法的耦合</b> .....	(199)
第一节 边界单元法与有限单元法的耦合.....	(199)
第二节 边界单元法与离散单元法的耦合.....	(201)
第三节 有限单元法与离散单元法的耦合.....	(203)

## 第二篇 工程地质数值模拟的应用

<b>第十二章 不连续面的模拟</b> .....	(208)
第一节 无厚度节理单元.....	(208)
第二节 等厚度节理单元.....	(211)
第三节 变厚度节理单元.....	(212)
第四节 层状岩体的模拟.....	(214)
第五节 不连续面的非线性分析.....	(215)
<b>第十三章 卸荷加载模拟</b> .....	(217)
第一节 卸荷过程的模拟.....	(217)
第二节 支护结构的模拟.....	(221)
第三节 实例.....	(223)
<b>第十四章 断裂扩展模拟</b> .....	(246)
第一节 基本原理.....	(246)
第二节 复合断裂判据.....	(249)
第三节 应力强度因子与断裂扩展力叠加原理.....	(253)
第四节 岩体断裂力学中的不连续位移数值方法.....	(256)
第五节 节理系扩展与相互作用研究.....	(259)
第六节 剪性断裂力学机制.....	(264)

第七节	区域断裂活动性分析·····	(270)
第八节	工程岩体稳定性分析·····	(273)
第九节	用数值流形元法模拟断裂扩展·····	(275)
<b>第十五章</b>	<b>损伤模拟·····</b>	<b>(277)</b>
第一节	几何损伤法·····	(277)
第二节	节理岩体损伤力学有限单元法程序设计·····	(280)
第三节	板岩山危岩体稳定性分析·····	(281)
<b>第十六章</b>	<b>反分析理论·····</b>	<b>(287)</b>
第一节	概述·····	(287)
第二节	初始地应力分布的函数表达式·····	(288)
第三节	正反分析法与逆反分析法原理·····	(290)
第四节	三维问题初始地应力分量的反演计算·····	(295)
第五节	有限元法·····	(297)
第六节	边界元法·····	(306)
第七节	反演分析的耦合计算法·····	(312)
第八章	岩土体变形参数反演确定·····	(316)
<b>第十七章</b>	<b>渗流场模拟·····</b>	<b>(320)</b>
第一节	概述·····	(320)
第二节	渗流场基本方程·····	(321)
第三节	渗流场分析的主要数值方法·····	(323)
第四节	应用实例·····	(327)
<b>第十八章</b>	<b>固液两相介质耦合分析·····</b>	<b>(343)</b>
第一节	概述·····	(343)
第二节	耦合分析的基本原理·····	(343)
第三节	渗流场与应力场耦合分析程序·····	(346)
第四节	应用实例·····	(346)
<b>主要参考文献</b>	<b>·····</b>	<b>(360)</b>

# CONTENTS

Chapter 1	INTRODUCTION .....	(1)
<b>PART 1 THEORY OF NUMERICAL MODELING IN ENGINEERING GEOLOGY</b>		
Chapter 2	BASIC KNOWLEDGE .....	(6)
Section 1	Stress and strain .....	(6)
Section 2	Common constitutive model .....	(11)
Section 3	Solution of large-scale linear equation .....	(17)
Section 4	Gauss quadrature formula .....	(21)
Section 5	Definition problem of groundwater flowage .....	(22)
Chapter 3	LINEAR-ELASTIC FINITE ELEMENT METHOD .....	(27)
Section 1	Basic theories and methods of finite element method .....	(28)
Section 2	Discreteness of continuum elastomer model .....	(35)
Section 3	Selection of mesh types and displacement mode .....	(39)
Section 4	Element analysis .....	(54)
Section 5	Load displace of equivalent node .....	(68)
Section 6	Whole analysis .....	(75)
Section 7	Engineering geological applications and examples .....	(86)
Chapter 4	NON-LINEAR FINITE ELEMENT METHOD .....	(94)
Section 1	Non-linear character of rock and soil .....	(94)
Section 2	Usual method of non-linear analysis .....	(96)
Section 3	Synopsis of increment plastic theory .....	(105)
Section 4	Usual elasto-plastic mode and solution .....	(112)
Section 5	Non-linear analysis of draught destruction .....	(122)
Section 6	An example .....	(125)
Chapter 5	FINITE ELEMENT METHOD OF RHEOLOGY .....	(130)
Section 1	Rheology character of rock and soil .....	(130)
Section 2	Finite element analysis of visco-elastic problem .....	(134)
Section 3	Finite element analysis of visco-plastic problem .....	(136)
Section 4	Finite element analysis of visco-elastic and visco-plastic problem .....	(139)
Section 5	An example .....	(141)
Chapter 6	DISCRETE ELEMENT METHOD .....	(145)
Section 1	Introduction .....	(145)
Section 2	Basic theory of discrete element method .....	(147)
Section 3	Solution of movement equation .....	(149)

Section 4	An example .....	(152)
Chapter 7	BOUNDARY ELEMENT METHOD .....	(159)
Section 1	Feature and classification of boundary element method .....	(159)
Section 2	Synopsis of direct boundary element method .....	(161)
Section 3	Indirect boundary element method—void stress method .....	(163)
Chapter 8	FAST LAGRANGIAN ANALYSIS .....	(169)
Section 1	Introduction .....	(169)
Section 2	Basic theory .....	(169)
Section 3	Introduction of FLAC programme .....	(172)
Section 4	An example .....	(173)
Chapter 9	DISCONTINUOUS DEFORMATION ANALYSIS .....	(181)
Section 1	Introduction .....	(181)
Section 2	Basic theory .....	(182)
Section 3	An example .....	(184)
Chapter 10	MANIFOLD METHOD .....	(191)
Section 1	Finite cover system of manifold method .....	(191)
Section 2	Finite element cover of 2-dimension manifold method .....	(193)
Section 3	Controlling equation of finite cover system .....	(198)
Chapter 11	COUPLING OF NUMERICAL METHODS .....	(199)
Section 1	Coupling of boundary element method and finite element method ..	(199)
Section 2	Coupling of boundary element method and discrete element method .....	(201)
Section 3	Coupling of finite element method and discrete element method .....	(203)

## PART 2 APPLICATION OF NUMERICAL MODELING IN ENGINEERING GEOLOGY

Chapter 12	SIMULATION OF DISCONTINUITIES .....	(208)
Section 1	Non-thickness joint element .....	(208)
Section 2	equal-thickness joint element .....	(211)
Section 3	Varying thickness joint element .....	(212)
Section 4	Simulation of layer rock .....	(214)
Section 5	Non-linear analysis of discontinuities .....	(215)
Chapter 13	LOADING AND UNLOADING SIMULATION .....	(217)
Section 1	Simulation of unloading process .....	(217)
Section 2	Simulation of timbering structure .....	(221)
Section 3	An example .....	(223)
Chapter 14	SIMULATION OF CRACK GROWTH .....	(246)
Section 1	Basic theory .....	(246)
Section 2	Complex rupture criterion .....	(249)
Section 3	Theory of stress intensity gene and rupture expanding power folding	

.....	(253)
Section 4 Discontinuous displace numerical method in rock rupture mechanics .....	(256)
Section 5 Expanding and reciprocity of joints .....	(259)
Section 6 Shearing rupture mechanism .....	(264)
Section 7 Regional rupture activity analysis .....	(270)
Section 8 Stability analysis of engineering rock masses .....	(273)
Section 9 Rupture expanding simulation with manifold method .....	(275)
Chapter 15 DAMAGE SIMULATION .....	(277)
Section 1 Geometry damage method .....	(277)
Section 2 FEM programming for rock mass damage mechanics .....	(280)
Section 3 Stability analysis of Ban-Yan Hill's crag .....	(281)
Chapter 16 BACK-ANALYSIS METHOD IN ENGINEERING GEOLOGY .....	(287)
Section 1 Introduction .....	(287)
Section 2 Function expression of original earth stress .....	(288)
Section 3 Positive back-analysis and negative back-analysis theory .....	(290)
Section 4 Back analysis for original earth stress in 3 dimension problem .....	(295)
Section 5 Finite element method .....	(297)
Section 6 Boundary element method .....	(306)
Section 7 Coupling method of back-analysis .....	(312)
Section 8 Back-analysis for displacement parameter of rock and soil .....	(316)
Chapter 17 SIMULATION OF SEEPAGE FIELD .....	(320)
Section 1 Introduction .....	(320)
Section 2 Basic equation of seepage field .....	(321)
Section 3 Main numerical methods for seepage field analysis .....	(323)
Section 4 An example .....	(327)
Chapter 18 COUPLING ANALYSIS FOR THE TWO-PHASE OF SOLID-LIQUID .....	(343)
Section 1 Introduction .....	(343)
Section 2 Basic theory of coupling analysis .....	(343)
Section 3 Program for coupling analysis of seepage and stress field .....	(346)
Section 4 An example .....	(346)
REFERENCES .....	(360)

# 第一章 概 论

近十多年来,随着电子计算机的广泛使用,解决工程地质问题的数值模拟理论和方法发展迅速,工程地质数值方法的不断成熟和完善,使得解决的工程地质问题更加广泛,研究的课题更加深入。一方面,飞速发展的工程地质学不断地提出新的难题,用现成的数学、力学理论对其无法作出确切的描述,工程地质数值方法为解决这类问题提供了可能的手段;另一方面,各种数值方法的不断成功应用,深化了人们对许多工程地质现象的理解,并有力地推动了工程地质学科的定量化进程。

长期以来,工程地质学被看成为经验性学科,对大多数复杂工程地质问题只能作出定性的分析。现代工程建设的规模越来越大,场地条件也越来越复杂,因而产生的工程地质问题也越来越复杂。对这些问题进行分析评价时,采用传统的解析法求解偏微分方程地质问题也越来越复杂。对这些问题进行分析评价时,采用传统的解析法求解偏微分方程是不可能的,因而数值分析方法得到广泛的应用。

数值方法的突出优点是能够较好地考虑诸如介质的各向异性、非均质特性及其随时间的变化、复杂边界条件和介质不连续性等复杂地质条件。高速电子计算机的广泛使用,解决了冗繁的数值运算问题,因而数值方法日益广泛地应用在工程地质问题分析的各个方面。

## 一、工程地质数值模拟的主要方法

在工程地质问题分析中,最常用的数值方法包括有限单元法、离散单元法和边界单元法。这些数值方法都有各自的长处和短处及适用条件,不能笼统地说哪种方法更好,应当根据具体工程地质问题的特点及其边界条件加以选用。

有限差分法是最早出现的数值方法,在计算机出现以前就有了,它至今在解决一些工程地质问题中仍然有效。有限单元法从20世纪50年代开始盛行,现已蔚为大观。边界单元法是70年代兴起的一种数值方法,由于它有降维作用,且计算精度高,对于解决无限域或半无限域问题尤为理想,所以也很适用于岩土体工程地质问题分析。半解析元法的基本思想是Y. K. Cheung在1968年提出来的,即有限条法,它是数理方程的解析方法与数值方法相结合的求解方法,借用部分解析解以减少纯数值方法的计算工作量,适用于解决高维、无限域及动力场问题。离散单元法最早是Cundall在1971年提出来的,以后发展极快,是一种很有发展前途的数值方法。无界元法是为了解决有限元法所遇到的“计算范围和边界条件不易确定”而提出来的,是解决岩石力学问题的另一类有效方法。

为了解决复杂的工程地质问题,对各种数值分析方法要扬长避短,集中各种数值方法的优点,近年来数值方法的耦合分析有了长足的进步,如有限单元法与边界单元法耦合,有限单元法与离散单元法耦合及边界单元法与离散单元法耦合等都有了不少应用,解决了不少复杂条件的数值模拟问题。

一般而言,数值方法可分为区域型和边界型两大类:区域型数值方法主要包括有限单元法、有限差分法和离散单元法等;边界型数值方法主要是边界单元法。

采用差分法时,将所考虑的区域分割成网格,用差分近似代替微分,把微分方程变换成差

分方程。也就是通过数学上的近似,把求解微分方程的问题变换成求解关于节点未知量的代数方程组的问题。

采用有限单元法时,将所考虑的区域分割成有限大小的小区域(单元),这些单元仅在有限个节点上相连接。根据变分原理把微分方程变换成变分方程。它是通过物理上的近似,把求解微分方程问题变换成求解关于节点未知量的代数方程组的问题。

离散单元法与有限单元法类似,它假定单元块体是刚体,块体单元通过角和边相接触,其力学行为由物理方程和运动方程控制。与有限单元法不同的是,它可以允许单元间相互脱离,单元可以产生较大的非弹性变形。

采用边界单元法时,根据积分定理,将区域内的微分方程变换成边界上的积分方程。然后将边界分割成有限大小的边界单元,把边界积分方程离散成代数方程。同样把求解微分方程变换成求解边界节点未知量的代数方程组,然后由边界节点上的值求出区域内任一点的函数值。

有限单元法是应用最广的数值方法,根据不同的本构方程,目前广泛使用的是线弹性有限元法、弹塑性有限元法、损伤有限元法、统计岩土模型有限元法等。

岩土体不同于一般固体力学研究的对象,有限单元法、边界单元法、有限差分法等均能成功地运用于均质或较均质岩土体问题。数值方法甚至可以通过方法本身的发展,如引入节理单元、增强非线性分析能力等手段,可分析含不连续界面和多介质的较复杂的岩土体的力学行为。但随着学科的发展和对岩土体认识的进一步深化,仅靠固体力学中常用的方法已不能满足工程地质、岩土力学数值分析的要求。显然,工程地质、岩土力学数值模拟问题比其他工程力学问题复杂得多,迫切需要建立更加简捷有效的新的数值方法。正是基于这一原因,新的数值方法一直是国际上研究的热点,近年来发展迅速。新出现的数值方法主要有:有限单元法中的节理单元法(joint element, JE)、块体理论(block theory, BT)、不连续变形分析(discontinuous deformation analysis, DDA)、快速拉格朗日法(fast Lagrangian analysis of continua, FLAC)、块体弹簧元法(block spring method, BSM)、无网络伽辽金法(element free Galerkin method, EFGM)和数值流形法(manifold method, MM)。这些方法对解决工程地质、岩土工程特殊问题特别有效。

## 二、工程地质数值法的应用范围与实施过程

### (一) 工程地质数值法的应用范围

#### 1. 工程地质现象机制的研究

工程地质数值模拟对于分析工程动力地质现象的机制具有特殊的意义。过去通过工程地质定性研究,揭示了工程岩土体的许多机制问题,但对于一些特殊问题的机制问题无能为力。数值方法可以从新的角度对许多以前一直不能很好解释的问题作出分析,并揭示出许多新的规律,从而为工程地质问题的分析提供一种新的手段。近年来,工程地质实践已经在这方面积累了越来越多的经验。

数值方法对工程地质现象与过程的模拟,主要是根据岩土体现有的变形破坏特征或发展阶段,在建立工程地质或岩体力学模型的基础上,再现工程岩土体过去的变形破坏发展演化历史,从而从整体上分析岩土体变形破坏内部作用过程及其全过程演化机制。一般地讲,这种数值模拟的意义并不在于具体数值的“准确性”,而在于对规律的探索。

#### 2. 反分析技术

反分析技术是近年来岩土力学和工程地质领域中最重要进展之一,它已成为学科前沿

热点课题。总体而言,反分析可分为应力反分析和位移反分析两类。由于反分析涉及复杂分析计算,它必须通过数值法求解。

位移反分析是通过岩土体边界条件的确定和岩土体位移的实测,建立合适的计算模型,求取岩土力学参数。

通过实测获得某些点的应力值资料,推测一定范围内应力场的状况是工程地质研究中的一个很重要的内容,是工程岩体稳定性分析必不可少的资料。通过应力的反分析,不仅可以得到工程区地应力场的总体认识,而且可以获得工程岩体应力边界条件。

### 3. 工程岩土体位移场和应力场的模拟

在已知工程区岩土体边界条件和外荷载的情况下,通过数值分析方法可以得到位移场和应力场分布的细节及其与外界条件的关系,这是数值方法的基本功能。此外,还可以计算应力场间接参数(如应力强度因子、断裂扩展力等)的空间分布特征。

### 4. 岩土体稳定性模拟

通过对岩土体变形破坏规律的模拟,可以分析其变形破坏的过程,评价其稳定性性状,并预测其未来变化。具体而言,可以解决两类问题:一是在已知边界条件和地质模型条件下的模拟再现,即通过模拟再现过去的发展历史,从而评价工程岩土体的稳定性现状,并在此基础上,通过对模型的时间延拓,预测其稳定性未来发展变化的趋势或失稳破坏方式;二是在边界条件及主导因素尚不甚清楚的条件下的模拟验证,即以不同的边界条件和主导因素建立力学模型,进行数值模拟,确定出对地质体变形破坏现状特征或演化阶段拟合得最好的模型,从而确定岩土体变形破坏的边界条件和主导因素,进而评价其稳定性。

### 5. 信息化设计与施工

通过施工过程中新揭示的岩土体地质特征和变形破坏规律,随时修正设计和施工方案是工程地质和岩土工程又一发展趋势,对此岩体结构面网络模拟技术和数值模拟是实现这一目标的重要手段。

工程地质数值模拟不是一个简单的“运算”过程,而是包含着从野外工程地质调查到室内试验研究、地质力学模型抽取、计算模拟和野外验证的全过程,它的可靠性和准确性在很大程度上取决于对地质原型认识的正确性。

## (二) 工程地质数值模拟的工作步骤和研究内容

### 1. 工程地质条件的调研

工程地质条件的查明是工程地质也是数值分析的基础和前提。对于工程地质条件的调研,不仅限于地质测绘,野外坑槽探、钻探、物探、试验和长期观测也是常用的手段。各具体的工程地质问题所侧重的调研内容不尽相同,如对区域稳定性问题,着重研究的是地壳现代应力场特征、断裂的现代活动与地震以及与此相关的水文地质条件等。值得注意的是,岩土体物理力学参数的测试,与地质体本构关系相关的地质条件的查明是本阶段不可忽视的工作。

### 2. 地质模型的抽取

地质模型是在工程地质条件综合分析的基础上,对工程地质体的概括或简化,也就是通常所说的定性研究结论的归纳,故也可称为“概念模型”。如对水库诱发地震控制性断裂的认识、地质边界条件、水文地质条件的组合特征、断层危险性分区分带及可能震中的判断等,即可看作为水库诱发地震的地质模型。应当看到,这种对地质体的认识必须是全面的、总体的,否则只能看作为模型的某一片断。可以认为,工程地质工作的主要任务就是在查明工程地质条件的基础上论证地质模型,解决工程地质问题。



### 3. 力学模型的建立

在地质模型的基础上,通过合理的抽象、简化和概括,便可建立工程地质数值分析的力学模型。力学模型是直接用作数值计算的,因此它必须突出控制工程地质问题的主导因素,既能准确地反映地质体的客观实际,同时又具有力学分析的可能性和计算机条件保障的可行性。与力学模型建立直接相关的几个问题包括:①具相对独立的力学结构范围的选取;②地质体条件(包括诸如断裂的选取)的确定;③计算边界条件(位移边界条件、应力边界条件和混合边界条件)的选用等。

### 4. 模拟结果的检验

数值计算应当满足一定的精度和可靠度。除通过适当的数学手段进行检验外,最根本的方法是将计算结果与实际工程地质条件对比。有时需要进行必要的理论分析和模型试验。检验时如果只挑选少数的数据核对,可能由于机会上的巧合,结论仍是错误的。只有针对具体的问题,采用整套的数据,才能取得真正符合实际的检验效果。如果数值计算结果存在较大的误差,应当着手改善输入数据,修改力学模型和数值计算方法,有时需要对计算模型进行调整。

## 三、影响工程地质数值模拟结果的主要因素

工程地质数值方法是解决工程地质问题的一种手段,它的正确与否在很大程度上取决于对工程地质条件的研究,而且必须通过工程地质实践加以检验。

首先,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着。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着偏差。

同时还应当看到,人们对地质体的认识仍在不断深化和发展着,有一些问题目前仍不能很好地认识和解决。如对与时间有关的变形和断裂现象仍在不断地探索之中,如果对与之相关的数值模拟期望过高是不切合实际的。

再者,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。

可见,工程地质数值方法并不是绝对的定量化方法,它正处在不断的完善和发展之中。

在工程地质研究中,数值模拟是为了正确描述研究对象,预测和解决工程实际问题;同时,在分析过程中深化对研究对象及其模型的认识。数值分析结果的合理性在很大程度上取决于模型建立的正确性和输入参数的可靠性。

模型乃是实体简化而不失真的摹体。研究对象不加以简化,难以用数学语言描述,无法模拟;然而,模型如果失真,也就不是实体的摹体。判断是否失真的准则是“等效性”,即模型对于激励的响应与实体是否一致或近似,简而言之,等效性是处理特定问题时,在功能上模型对于实体的一致性 or 相似性。一般认为,当模拟结果以一定的精度再现,并与观测数据系列或现象类似时,便认为模型结果良好,但一定要注意问题的多解性,不注意问题的多解性常常是数值计算失误的重要原因。

对于地质体缺乏充分正确的认识,受主观直觉的引导,或对模型本身缺乏实质性的认识,在实际资料的处理,边界条件、初始条件的确定等方面往往就会偏离实际,这将会导致建立一个歪曲问题本质的地质或力学数学模型。因此,在工程地质数值分析中,模型的正确建立是至关重要的一步。