

岩土工程数值计算

雷晓燕 著

中国铁道出版社

1999年·北京

(京)新登字 063 号

内 容 简 介

本书详细介绍了用有限元法求解塑性、弹塑性耦合、应变软化、粘塑性和蠕变问题的数值方法;论述了边界元法、离散元法、节理单元和无穷元等数值方法的基本原理,讨论了岩土工程中的特殊问题,如接触问题、锚杆单元、材料参数反分析、耦合问题以及动力问题的数值计算,最后介绍了有限元误差估计和自适应问题。

本书可作为工科院校岩土工程专业本科生及研究生的教材,也可作为土木、交通、水利专业工程技术人员和教师的参考书。

图书在版编目(CIP)数据

岩土工程数值计算/雷晓燕著.-北京:中国铁道出版社,1999

ISBN 7-113-03399-7

. 岩... . 雷... . 岩土工程-数值计算 .TU4

中国版本图书馆 CIP 数据核字(1999)第 45937 号

书 名: 岩土工程数值计算

著作责任者: 雷晓燕

出版·发行: 中国铁道出版社(100054,北京市宣武区右安门西街8号)

责任编辑: 江新锡

封面设计: 李艳阳

印刷: 中国铁道出版社印刷厂

开 本: 850×1168 1/32 印张: 10.375 字数: 257 千

版 本: 1999 年 10 月第 1 版 1999 年 10 月第 1 次印刷

印 数: 1— 册

书 号: ISBN 7-113-03399-7/TU·602

定 价: 29.50 元

版权所有 盗印必究

凡购买铁道版的图书,如有缺页、倒页、脱页者,请与本社发行部调换。

NUMERICAL COMPUTATION
IN
ROCK AND SOIL ENGINEERING

Xiaoyan Lei

Department of Civil Engineering,
East China Jiaotong University,
330013, Nanchang, P. R. CHINA

China Railway Publishing House
1999 Beijing

序

雷晓燕教授撰写的《岩土工程数值计算》一书,将现代工程数值计算方法有效地应用于岩土基础的复杂情况,书中探索和介绍了在各种具体复杂的情况下应用最新离散计算方法的可能,其中包括作者在国内、外,特别是在中奥科学研究合作中所取得的有限元、边界元等多方面的综合先进计算技术。

本人认为作者在前言中实事求是地介绍了本书内容上的特点。应该指出的是,雷晓燕教授所著的《岩土工程数值计算》一书,不但在岩土工程方面提供了最新的工程计算方法,解决了许多实际问题,而且在推进计算力学学科发展方面,是有力的贡献。

清华大学固体力学教授
中国工程院院士

1999.4.25

About this book

The book, Numerical Computation in Rock and Soil Engineering, authored by Prof. Xiaoyan Lei, represents feature of effectively applying the numerical computational method in modern engineering to complicated problems in rock foundation. It deals with the possibilities of utilizing the newest discrete computational methods, which include the advanced computational techniques of finite elements and boundary elements achieved by author in home and abroad especially in China-Austria scientific cooperation, to cases of all kinds of complicated engineering situations. I think what the author described in preface really affects the features of this book. It should be pointed out that Prof. Lei not only presents applications of the newest engineering computational method in field of rock and soil engineering but also makes great contributions to the development of computational mechanics.

Qinghua Du

Professor in solid mechanics, Tsinghua University

Member of Chinese Academy of Engineering

1999.4.25

前 言

近年来,数值方法一直在不断地发展,它已渗透到科学与工程技术研究的各个主要领域。数值方法的突出优点是能够替代昂贵而又非常耗时的物理试验,对所研究的问题进行数值模拟。本书主要论述岩土工程数值方法的基本原理及其应用。岩土工程是一门交叉学科,其理论广泛应用于隧道开挖、矿山开采、兴建水利设施及地下建筑物等。随着数值方法的不断发展和功能越来越强大计算机的出现,数值模拟已成为工程技术人员必不可少的分析工具。本书正是为了适应工程技术人员日益增长的对掌握数值方法的要求而写作的。它的读者对象主要是岩土工程和土木工程高年级本科生、研究生和工程技术人员。书中内容主要取自国内外学者近一二十年来运用数值方法在岩土工程领域所做的工作,部分内容属作者的研究成果。全书共分十一章,内容包括非线性有限元法、边界元法、离散元法、节理单元、无穷元、接触问题、锚杆单元、材料参数反分析、耦合问题、动力问题及有限元误差估计和自适应问题。

第一章介绍了非线性有限元方程组的解法,论述了用有限元法求解塑性、弹塑性耦合、应变软化、粘塑性和蠕变问题的数值方法。

第二章以二维、三维弹性力学问题为例,详细阐述了边界元法的基本概念及数值方法,内容包括基本解、边界积分方程、边界单元、体积力项的处理等,这一章还介绍了工程上常用的两种有限元与边界元耦合方法。

第三章介绍了离散元法——刚体模型,着重论述了离散元法的概念,刚体动力学、接触判别及接触与相互作用力等问题。

第四章为离散元法的变形体模型,这章内容涉及变形体动力学,模态分解,有限元模态分解,离散系统分析的广义模态法,本构

关系及变形体单元分析举例等。

第五章介绍了岩土工程上常用的节理单元、无穷元及无拉应力模型,包括四结点、六结点、三维节理单元和夹层单元。

第六章接触问题为作者自己的研究成果,主要内容有二维、三维接触单元、大位移接触理论、消除接触摩擦单元应力振荡的方法及运用接触摩擦单元对节理岩体中隧道开挖进行有限元模拟。

第七章介绍了锚杆的本构性质和三维锚杆单元理论及若干运用锚杆单元分析实际问题的例子。

第八章介绍了工程上常用的三种材料参数反分析法,即直接法、逆解法和偶边界法,并给出了材料反分析在路基边坡中的应用。

第九章讨论了耦合问题,涉及流固耦合,土—毛细孔流相互作用,隐式与显式耦合算法及交叉求解方法。

第十章是求解动力问题较新的算法,重点介绍单步长算法和二阶微分方程的一般算法。

第十一章讨论了有限元误差估计和自适应问题,内容包括误差范数和收敛速度,误差估计(h 细分法)及自适应分析。

书中内容力求跟踪学术前沿,紧密联系工程实际。希望能给读者一些启发。尽管如此,限于作者水平,错误和不当之处还请读者批评指正。

雷晓燕

1999. 3. 1

Preface

In recent years numerical methods have continued to expand and diversify into all the major fields of scientific and engineering studies. The advantages of them are to provide a valuable alternative to physical models that can be expensive and time consuming. This book deals with elementary principles of numerical methods in rock and soil engineering and applications. Rock and soil engineering is a staggered subject and the theories of which are widely used to tunneling, mining and construction of water conservancy facilities and underground structures. It is aimed at graduate and post graduate students as well as professional engineers of rock and soil and civil engineering who are being increasingly called upon to obtain the knowledge of numerical methods. This book has drawn its materials from research work performed by scholars at home and abroad in recent decades by using numerical methods to field of rock and soil engineering and some are author's research achievements. It is divided to eleven chapters which covers non-linear finite element method, boundary element method, discrete element method, joint elements, infinite elements, contact problems, anchor bolts, back analysis of material parameters, coupling problems, dynamic problems, error estimation of finite elements and adaptivity.

Chapter 1 gives introduction to solutions of non-linear finite element equations. It discusses numerical methods of solving problems of elasto-plasticity, coupling of elasticity and plasticity,

stain softening, visco-plasticity and creep by finite element method.

Chapter 2 takes two and three dimensional problems as examples and deals with elementary concepts and numerical method of boundary elements. It includes fundamental solutions, boundary integral equations, boundary elements and treatment of body forces and so on. It also introduces two schemes of coupling finite elements and boundary elements that are commonly used in engineering practice.

Chapter 3 discusses the discrete element method applied to rigid bodies. It highlights concepts of the method, rigid body dynamics, techniques of contact detection, contact and interaction forces and so on.

Chapter 4 describes the discrete element method for deformable bodies, which covers dynamics of deformable bodies, model decomposition, model decomposition in finite elements, generalized model methods for the analysis of discrete systems, constitutive relationships and some examples for deformable body analysis.

Chapter 5 gives joint elements, infinite elements and non-tensile stress model. Types of these elements are 4-node, six node and three dimensional joint elements and sandwich elements.

Chapter 6 deals with research achievements by author, including two and three dimensional contact elements, large displacement theory, technique of eliminating stress oscillation on interface of contact friction elements and modeling of tunnel excavation in jointed rocks with finite elements.

Chapter 7 discusses the constitutive behavior of anchor bolts and theory of three dimensional anchor bolts as well as applications in practice by using this element.

Chapter 8 is devoted to three kinds of back analysis methods of material parameters such as direct method, inverse method and dual boundary method. Applications of back analysis of materials in embankment are given.

Chapter 9 discusses coupling problems. It covers fluid-structure interaction, soil-pore fluid interaction, implicit-explicit combination schemes and staggered solution processes.

Chapter 10 deals with the newer algorithms of solving dynamic problems. It highlights single step algorithms and general algorithms for second order differential equations.

Chapter 11 is concerned with error estimation of finite elements and adaptivity. It covers error norm, convergence rates, error estimation with h refinement and adaptive analysis.

Xiaoyan Lei

1999.3.1

主要符号

- a^e 单元结点位移向量
- a, \dot{a}, \ddot{a} 系统结点位移、速度和加速度向量
- a^* 接触单元给定的结点相对位移或接触应力向量
- a 接触单元给定的结点相对位移向量
- A 局部坐标系中接触单元增量相对位移向量
- b_i 体力分量
- b 体力向量
- b_t, b_n 与界面量和非界面量相对应的体力项
- B 应变矩阵
- $c(\)$ 粘性系数
- C_{ijkl} 四阶张量
- C 系统阻尼矩阵
- d, d_e, d_p, d_{vp} 应变增量、弹性应变增量、塑性应变增量、粘塑性应变增量
- d 应力增量
- D, D_{ep}, D_p 弹性矩阵、弹塑性矩阵、塑性矩阵
- e_r 误差允许值
- e_{ijk} 置换张量
- e 误差范数
- $e_{u, L_2}, e_{\sigma, L_2}$ 位移和应力误差的 L_2 范数
- E 弹性模量
- E^t 切线模量
- $f = -Q$ 系统结点荷载向量
- $f(\ ,^p, w^p)$ 应变空间屈服函数
- f_0 线频率

f_c 接触单元等效单元结点荷载向量

$F(\sigma, p)$ 应力空间屈服函数

F^e 单元结点力向量

g 弹性变形向量

G 剪切模量

G_B 锚杆横向剪切模量

G_{ij}^* 伽辽金张量

G 边界元系数矩阵

$H(1)$ 阶梯函数

$H = \frac{d_s}{d_p}$ 塑性模量

H 边界元系数矩阵

i 迭代步

i, j, k 笛卡尔坐标系单位向量

I 单位矩阵

J_2 第二应力不变量

J_3 第三应力不变量

k_n, k_s 法向与切向刚度系数

k_n^1, k_n^m 法向刚度系数

k_s^m 剪切刚度系数

k^e 单元刚度矩阵

k_c 接触单元等效单元刚度矩阵

K 动能

K_s 锚杆横向剪切刚度

K 系统刚度矩阵

K^s 对称刚度矩阵

K_T 切线刚度矩阵

l_i, m_i, n_i 方向余弦分量

L, L 坐标转换矩阵

m 荷载增量步
 M_1, M_m, M_{1m} 板单元单位长度的弯矩和扭矩
 M 系统质量矩阵
 n, s, t 局部坐标系
 N 插值函数矩阵
 p 流体压力
 p_i 面力分量
 p_{ij}^* 面力基本解
 p 待识别的材料参数
 \bar{p} 结点流体压力向量
 \dot{p} 结点流体压力对时间的一阶导数
 \ddot{p} 结点流体压力对时间的二阶导数
 p^n 边界单元结点面力向量
 p 边界单元总结点面力向量
 Q 塑性势函数
 Q^e 单元结点荷载向量
 Q 系统结点荷载向量
 Q 接触单元给定的结点接触应力向量
 r, r 位置向量、变形前的位置向量
 R_n, R_s 接触点的法向力和切向力
 R 反旋转矩阵
 S_x, S_y, S_z 偏应力分量
 $S = N^T N d$ 插值函数矩阵
 t 面力向量
 t_i, t_n 界面面力、非界面面力向量
 T 转换矩阵
 u_i 位移分量
 u_{ij}^* 位移基本解
 u 单元内任意一点的位移向量

u_n 边界单元结点位移向量

U 内应变能

U 边界单元总结点位移向量

U_I, U_n 界面位移、非界面位移向量

v 流体速度向量

w 误差函数

w_1, w_2 权函数

w^p 塑性功

W 外力功

x, y, z 笛卡尔坐标系

x 域内任一点坐标向量

坐标转换矩阵

s 节理单元局部坐标剪应变

边界

a, \quad , \quad 增量位移、增量应变、增量应力向量

f_n, f_s 法向与切向增量接触力

t_{crit} 临界时间步长

$t_m = t_{m+1} - t_m$ 时间增量

u_n, u_s 法向与切向增量相对位移

σ_i, σ_j 应力误差的均方根

n 节理单元局部坐标正应变

ϵ_{ij} 应变张量

ϵ_{jki}^* 在 i 点沿 e_i 方向施加单位荷载引起任一点 q 处的应变分量

ϵ^p 等效塑性应变

ϵ^e 单元应变向量

$\dot{\epsilon}, \dot{\epsilon}_c, \dot{\epsilon}_e, \dot{\epsilon}_{vp}$ 应变率、蠕变应变率、弹性应变率、粘塑性应变率向量

ϵ^0, ϵ^* 能量范数指标

$(0 \quad 1)$ 欧拉法系数

$\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3$ 算法参数

i, i 角位移、角速度分量

硬化参数

n, s 节理的法向与切向劲度系数

$, ,$ 局部坐标系

系统势能

质量密度

$m = \frac{1}{3}(\sigma_x + \sigma_y + \sigma_z)$ 平均应力

n 节理单元局部坐标系法向应力

s 材料单向屈服应力

有效应力

σ_{ij} 应力张量

σ_{jki}^* 在 i 点沿 e_i 方向施加单位荷载引起任一点 q 处的应力分量

σ_0 初应力向量

σ^e 单元应力向量

T 拉应力修正矩阵

应力率

局部坐标系中接触单元增量接触应力向量

p 峰值剪切强度估计值

s 节理单元局部坐标系剪应力

泊松比

$(\)$ 内摩擦角

i 固有模态

特征向量矩阵

插值函数矩阵

有限元方程误差向量

ω_0 角频率

角速度向量

域内

目 录

第一章 非线性有限元法.....	1
1.1 有限元法概述	1
1.2 非线性有限元方程组的解法	5
1.3 塑性问题.....	10
1.4 弹塑性耦合与应变软化.....	21
1.5 粘塑性 蠕变问题.....	25
1.6 算 例.....	30
第二章 边界元法	33
2.1 弹性力学基本方程的张量表示.....	33
2.2 索密哥内那等式.....	34
2.3 基 本 解.....	36
2.4 域内应力.....	37
2.5 边界积分方程.....	38
2.6 数值方法.....	41
2.7 边界单元.....	42
2.8 边界应力.....	46
2.9 二维问题.....	47
2.10 体积力项的处理	48
2.11 有限元与边界元耦合法	50
2.12 算例	53
第三章 离散元法- 刚体模型	56
3.1 引 言.....	56
3.2 离散元的概念.....	57
3.3 刚体动力学.....	62
3.4 接触判别与几何模拟.....	66

3.5	接触与相互作用力.....	79
3.6	算 例.....	83
第四章	离散元方法- 变形体模型	88
4.1	变形体动力学.....	88
4.2	模态分解.....	94
4.3	有限元模态分解.....	98
4.4	一维问题详述.....	99
4.5	离散系统分析的广义模态法	106
4.6	本构关系	113
4.7	变形体单元分析举例	116
第五章	节理单元 无拉应力模型 无穷元.....	121
5.1	四结点节理单元	121
5.2	六结点曲边节理单元	127
5.3	六结点曲边夹层单元	130
5.4	三维曲面节理单元	132
5.5	三维曲面夹层单元	136
5.6	无拉应力计算模型	139
5.7	无 穷 元	142
第六章	接触问题.....	148
6.1	二维接触问题	148
6.2	三维接触问题	154
6.3	大位移接触摩擦单元	162
6.4	消除接触摩擦单元应力振荡的方法	169
6.5	节理岩体中隧道开挖的有限元模拟	174
第七章	锚杆单元.....	179
7.1	锚杆的本构性质	179
7.2	三维锚杆单元理论	183
7.3	算 例	191
第八章	材料参数反分析及其应用.....	195
8.1	直 接 法	196