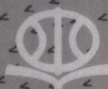


© 陈胜宏 著

*Computational
Rock Mechanics
and
Engineering*

计算岩体力学与工程



中国水利水电出版社
www.waterpub.com.cn

© 陈胜宏 著

*Computational
Rock Mechanics
and
Engineering*

计算岩体力学与工程



中国水利水电出版社
www.waterpub.com.cn

内 容 提 要

本书依托水利水电工程,以弹粘塑性势理论为基础,以有限单元法、块体单元法和复合单元法等具有代表性的数值分析方法为主线,对计算岩体力学的本构模型、力学参数、计算方法、安全指标以及可视化软件等关键问题展开讨论,形成了较为全面的科学研究体系。

本书介绍的理论、方法和软件在三峡、水布垭、龙滩、小湾等多个国家重点水利水电工程岩体边坡和大坝基础的稳定问题中进行了应用,解决了一批工程设计和施工技术难题,取得了较大的社会效益和经济效益。此外,本书还介绍了采用面向对象和可视化技术的有限单元法及块体单元法计算软件,并给出了主要的源程序。

本书可供水工结构工程和岩土工程领域从事计算岩体力学研究与应用的技术人员和科研人员阅读参考,也可作为该领域研究生相关课程的参考教材。

图书在版编目(CIP)数据

计算岩体力学与工程 / 陈胜宏著. —北京: 中国水利水电出版社, 2006

ISBN 7 - 5084 - 3583 - 4

I. 计... II. 陈... III. 计算力学: 岩石力学
IV. TU45

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2006) 第 008979 号

书 名	计算岩体力学与工程
作 者	陈胜宏 著
出版 发行	中国水利水电出版社 (北京市三里河路 6 号 100044) 网址: www.waterpub.com.cn E-mail: sales@waterpub.com.cn 电话: (010) 63202266 (总机)、68331835 (营销中心)
经 售	全国各地新华书店和相关出版物销售网点
排 版	中国水利水电出版社微机排版中心
印 刷	北京市兴怀印刷厂
规 格	787mm×1092mm 16 开本 33 印张 783 千字
版 次	2006 年 5 月第 1 版 2006 年 5 月第 1 次印刷
印 数	0001—3000 册
定 价	79.00 元

凡购买我社图书,如有缺页、倒页、脱页的,本社营销中心负责调换

版权所有·侵权必究

前 言

计算岩体力学诞生于20世纪60年代,是计算机技术与应用数学、应用力学以及工程实践相结合的成功案例。自20世纪80年代以来,由于土木工程、环境工程和水利水电工程的快速发展,我国计算岩体力学的研究与应用获得了强大的推动力,目前已居国际先进水平。作为水利水电工程科学工作者,获得如此难得的研究机遇,实乃三生有幸。

水电是我国能源工业的重点发展方向。“十五”期间,水电能源开发布局进一步向西南和西北高山峡谷地区的大江大河转移,工程规模进一步加大。正在建设中的龙滩和光照碾压混凝土重力坝、水布垭面板堆石坝,其高度已达200m级,小湾和溪洛渡拱坝则达300m级。高坝大库带来了坝基、坝肩、边坡、地下洞室等结构稳定和变形控制的一系列岩体力学问题,涉及的对象主要是节理岩体,并具有岩性、构造、历史和环境等综合体的特征。稳定和变形控制问题的成功解决,有赖于计算岩体力学以下几个方面

(1) 正确的岩体力学模型。工程岩体的最大特点是含有大量的节理、断层等结构面,而且含有大量的锚杆、锚索等加固构件。因此,在研究岩体力学模型时,既要复杂的问题进行简化和粗化,又要能合理地反映岩体变形和失稳的真实机理。

(2) 正确的岩体力学参数。岩体介质是赋存于地壳之中的天然材料,其物理、化学和力学性质在空间上具有随机性。现场原位试验代价很高且代表性差,实验室试验的结果也不能直接应用于工程设计,所以岩体力学与工程问题是数据有限的问题,很多工程计算的失败源于参数的错误选择。因此,开展施工过程的安全监测,并强调监测信息的及时反馈,是非常必要的。

(3) 正确的计算方法。目前,计算岩体力学已涌现出许多方法,大体可以归类为连续介质力学方法和不连续介质力学方法。连续介质力学方法的代表是有限单元法和边界单元法等,不连续介质力学方法的代表是离散单元法和不连续变形分析法等。由于实际岩体同时具有连续介质和不连续介质的特征,而这些方法都是仅从一个侧面去模拟岩体,因此所得结论是片面的。作

为工程科学研究者，需要对计算方法不断改进，同时也要注意不同方法的综合应用分析。近年来出现的无单元法和数值流形方法等方法，尽管离解决复杂实际工程问题尚有差距，但它们代表的是一种正确的研究方向。

(4) 实用的软件。软件是计算方法的载体。目前，国内外已有一批很好的专业软件，但在软件编制的规范性和软件应用的便捷性方面还有一些不足之处，其计算效率和结果也存在较大的差异。近年来，研究者开始采用面向对象技术研制可视化软件，使计算软件的应用范围逐渐从研究者推向工程实践者，既简化了维护和扩充工作，也为计算软件的广泛应用奠定了坚实的基础。

近10年来，笔者有幸主持及参与了多项“八五”、“九五”国家重点科技攻关项目、国家自然科学基金项目、国家有关部委科技基金和重点科技攻关项目，并且主持参与了多个国家重点水电工程技术问题的应用研究项目，依托这些项目，在计算岩体力学方面取得了一些成果。2001年，笔者总结了有限单元法和块体单元法的部分研究成果，撰写了《高坝复杂岩石地基及岩石高边坡稳定分析》一书，由中国水利水电出版社出版。根据最近几年的研究新进展，笔者对上述专著进行了补充和完善，按数值分析方法进行分类，以代表连续介质力学方法的有限单元法、代表不连续介质力学方法的块体单元法和具有以上两类方法相结合特征的复合单元法为主线展开讨论。笔者希望通过本书，从理论上较系统地总结自己的研究成果，并且为工程设计提供有用的参考资料。

笔者从事教学与科研工作近20年，根据自身在工作实践中的心得体会，深感前辈学者在岩体力学领域建立的理论与实践相结合的研究思想的重要性，并有意在本书的写作中加以体现。本书在理论和方法方面，着重探讨了加锚节理岩体本构模型的建立、岩体力学参数反演、变形和稳定的反馈分析与加固布设优化、基于自适应技术的计算方法与软件的规范化、基于面向对象技术的计算软件的体系化、基于可视化技术的计算软件的实用化等问题。在工程应用方面，主要依托笔者长期服务且比较熟悉的水利水电工程领域，分别针对坝基和坝肩、边坡等结构，探讨了用计算岩体力学解决渗流、稳定和变形控制等问题的思路和技术要点。由于知识面和经历的限制，对水利水电以外的土木和环境工程领域（采矿、交通、城市建筑、军事工程等）接触不多，故写作时未涉及，笔者深以为憾。

本书的理论研究是近10年来在国家及有关部委的科技项目资助下完成的，主要有：

(1) 国家自然科学基金重大项目子题——岩体的加固机理及弹粘塑性自适应有限元分析。

(2) 国家自然科学基金面上项目——岩体的三维弹粘塑性块体理论与p型自适应分析。

(3) 国家自然科学基金重点项目子题——裂隙岩体的锚固分析研究。

(4) 国家自然科学基金面上项目——高坝开裂过程的三维p型自适应复合单元法研究。

(5) 国家“九五”重点科技攻关项目子题——高拱坝抗滑稳定安全系数及岩体力学参数研究。

(6) 国家“九五”重点科技攻关项目子题——弹粘塑性块体理论与分载法的耦合分析。

(7) 国家教委高等学校博士学科点专项科研基金——工程岩体的不连续弹粘塑性变形分析及可靠度评价。

(8) 国家教委高等学校博士学科点专项科研基金——水工结构的自适应弹粘塑性有限元理论。

(9) 国家电力公司重点科技项目——水工建筑物反馈设计与施工方法研究。

(10) 国家电力公司重点科技攻关项目子题——坝基开挖方式及加固措施研究。

(11) 国家电力公司重点科技攻关项目子题——小湾右岸坝前边坡开挖支护措施研究。

(12) 国家电力公司重点科技攻关项目子题——水电工程岩石边坡稳定性分析有限元计算机软件系统研究。

(13) 水利部科技创新项目——滑坡灾害评价、预测及防治关键技术研究。

本书的工程应用研究是在国家所属各主要水利水电工程设计、研究、施工与管理部門的支持下完成的，在此一并致谢。

笔者非常感谢多年来共同工作、为本书的研究成果作出贡献的同事与学生，他们是：陈尚法、汪卫明、徐明毅、傅少君、王书法、陈敏林、李桂荣、张君禄、王劲松、程昭、曹新红、夏怀孝、吴俊、李永明、费文平、秦卫星、陈士军、冯学敏、胡静、强晟、徐青、郑惠峰、何则干、许桂生、彭成佳等。

计算岩体力学是一个正在迅速发展的学科分支，在理论和实践上都有很大的拓展和完善空间，每年有大量的文献发表，笔者在研究和写作过程中，

也通过阅读文献获得了启发。但由于个人精力有限，且笔者又试图以自身研究及应用成果为主干进行本书的写作，所以对当前国内外研究进展和文献的总结不免有偏颇和遗漏之处。笔者也希望借助本书的出版，与同行交流研究心得体会，并诚恳期待同行们的批评指正。

陈胜宏

2006年1月

于武汉东湖珞珈山

目 录

前言

第一篇 有限单元法

第一章 有限单元法基础	3
第一节 应力应变分析的基本原理.....	3
第二节 非线性问题.....	4
第三节 动力问题.....	6
第四节 渗流分析的基本原理.....	9
参考文献.....	13
第二章 有限单元法网格离散技术	15
第一节 概述.....	15
第二节 曲线与曲面拟合.....	17
第三节 二维域网格生成系统.....	23
第四节 三维域四面体网格生成系统.....	29
第五节 四面体有限单元网格的优化.....	33
参考文献.....	36
第三章 有限单元法中加锚节理岩体的力学模型与本构关系	39
第一节 加锚节理岩体的等效模拟.....	39
第二节 加锚节理岩体的离散模拟.....	49
第三节 算例与验证.....	66
参考文献.....	68
第四章 基于有限单元法的反分析方法	71
第一节 概述.....	71
第二节 初始地应力反分析.....	72
第三节 力学参数反分析.....	74
第四节 反分析的回归分析方法.....	75
第五节 反分析的人工神经网络方法.....	79
第六节 反分析的遗传算法.....	85
参考文献.....	95

第五章 有限单元法中弹粘塑性问题的时步自适应研究	97
第一节 时步自适应的误差估计	97
第二节 时步自适应的实现方式	98
第三节 简单算例	99
参考文献	99
第六章 h型自适应有限单元法：应力应变分析	101
第一节 概述	101
第二节 误差分析与尺度估计	103
第三节 应力（应变）恢复方法	105
第四节 网格间数据传递	111
第五节 算例考察	114
参考文献	118
第七章 h型自适应有限单元法：渗流分析	122
第一节 误差分析与尺度估计	122
第二节 算例考察	123
参考文献	127
第八章 p型自适应有限单元法：基本理论	128
第一节 阶谱单元及其基函数	129
第二节 离散误差估计与自适应升阶方法	142
第三节 关键算法	148
参考文献	156
第九章 p型自适应有限单元法：技术问题	158
第一节 节理单元模型	158
第二节 弹粘塑性分析	160
第三节 渗流分析	161
第四节 动力分析	162
第五节 程序实现	164
第六节 算例考察	168
参考文献	173
第十章 有限单元法分析软件的面向对象开发	174
第一节 概述	174
第二节 软件系统的整体设计	176
第三节 前处理模块	182
第四节 有限单元分析和网格误差估计模块	203
第五节 后处理模块	204
第六节 界面交互技术	208
第七节 三板溪水电站应用实例	224
参考文献	230

第十一章 有限单元法在坝基与坝肩工程中的应用	231
第一节 宝珠寺水电站工程重力坝坝基稳定分析	231
第二节 小湾水电站工程坝区地应力场反演分析	235
第三节 小湾水电站工程拱坝坝肩开挖稳定分析	242
第四节 小湾坝肩抗力体加固分析与方案优化	248
第十二章 有限单元法在边坡工程中的应用	253
第一节 水布垭水电站工程大岩淌滑坡稳定分析	253
第二节 三峡水利枢纽工程永久船闸人工开挖边坡反馈分析	257
第三节 龙滩水电站工程进水口人工开挖边坡反馈分析	266
第十三章 有限单元法的其他问题初探	276
第一节 安全指标	276
第二节 应变局部化	282
参考文献	286

第二篇 块体单元法

第一章 三维复杂岩石块体单元系统的识别	291
第一节 矢体的概念	291
第二节 数据结构	292
第三节 识别方法	293
第四节 特殊情况的处理	296
第五节 主要算法	298
第六节 算例考察	301
参考文献	303
第二章 块体单元法的基本理论	304
第一节 楔形体稳定分析的基本问题	304
第二节 有限单元法分析的结论	306
第三节 刚体极限平衡法的改进	306
第四节 多块体单元系统的推广	309
第五节 算例考察	318
参考文献	320
第三章 块体单元系统的渗流分析	321
第一节 渗流模型与基本方程	321
第二节 求解技术	323
第三节 算例考察	326
参考文献	326
第四章 阶谱块体单元法	328
第一节 数值分析与模型试验的比较	328

第二节	考虑变形的初步尝试	330
第三节	阶谱块体单元法的建立	337
第四节	阶谱块体单元法在连续介质中的应用	344
参考文献	349
第五章	块体单元法与其他方法的耦合	351
第一节	块体单元法与拱梁分载法的耦合	351
第二节	块体单元法与有限单元法的耦合	362
参考文献	366
第六章	块体单元法的拓展研究	367
第一节	加固分析	367
第二节	随机分析	372
第三节	动力分析	377
第四节	开裂分析	379
第五节	p型自适应分析	382
参考文献	386
第七章	块体单元法分析软件的面向对象开发	388
第一节	AVS软件简介及其应用	389
第二节	软件系统的整体设计	391
第三节	计算模块类的功能和设计	393
第四节	工程应用实例	399
参考文献	402
第八章	块体单元法在小湾水电站工程中的应用	403
第一节	工程简况	403
第二节	坝基和坝肩运行期稳定渗流分析	404
第三节	坝基和坝肩运行期稳定分析	409
第四节	坝基和坝肩与拱坝运行期耦合分析	413
第五节	坝基和坝肩施工期非稳定渗流场分析	421
第六节	坝基和坝肩施工期稳定分析与加固优化	431
第七节	进水口边坡施工期稳定分析与加固优化	437
第九章	块体单元法在其他水电站工程中的应用	444
第一节	宝珠寺水电站工程大坝与坝基稳定分析	444
第二节	大花水水电站工程坝肩与拱坝运行期耦合分析	449
第三节	龙滩水电站工程右岸坝肩边坡稳定分析	457

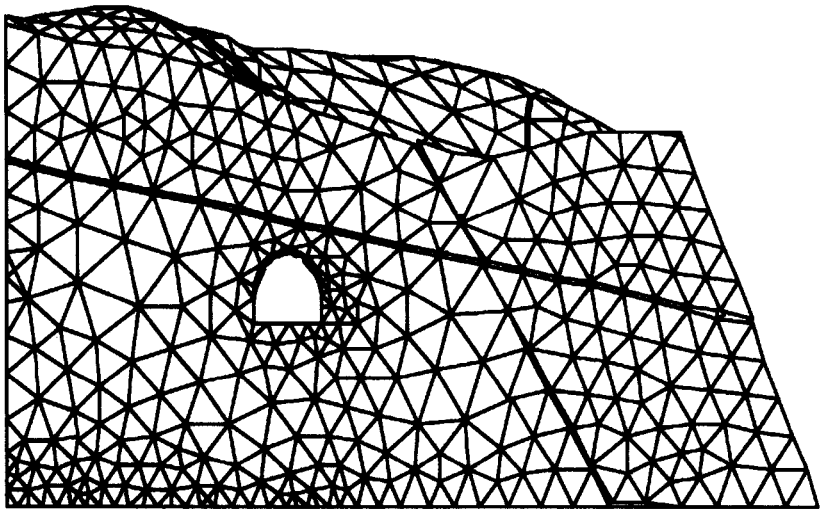
第三篇 复合单元法

第一章	复合单元法的概念与原理	465
第一节	应力应变问题的提法	466

第二节 渗流问题的提法	467
参考文献	469
第二章 应力应变分析中砂浆锚杆模拟的复合单元法	472
第一节 坐标系及其变换	472
第二节 本构方程	473
第三节 平衡方程	475
第四节 程序的实现与考核	479
参考文献	481
第三章 应力应变分析中空锚杆模拟的复合单元法	482
第一节 基本方程	482
第二节 程序的实现与考核	483
参考文献	485
第四章 应力应变分析中结构面模拟的复合单元法	486
第一节 坐标系及其变换	486
第二节 本构方程	486
第三节 平衡方程	488
第四节 程序的实现与考核	490
参考文献	495
第五章 渗流分析中排水孔模拟的复合单元法	496
第一节 空气单元的概念	496
第二节 复合单元法的基本方程	499
第三节 罗汉寺闸水利工程应用	504
参考文献	507
第六章 渗流分析中结构面模拟的复合单元法	508
第一节 基本方程	508
第二节 宝珠寺水电站工程应用	510
参考文献	514

第一篇

有限单元法



第一章 有限单元法基础

有限单元法是应用广泛的一种结构计算分析方法，本质上属于连续介质力学体系。有限单元法的思想形成于 20 世纪 40 年代，在 1956 年航空工程飞行结构的应力分析中被完整提出 (Turner, Clough, Martin, Topp, 1956)。有限单元法 (Finite Element Method) 这一名称则于 1960 年由 Clough 在其有关结构计算分析的论文中首先提出。中国对有限单元法的研究始于 20 世纪 60 年代初，在分析刘家峡大坝的应力场时，冯康教授等人结合传统的差分法和能量原理，提出了一种以变分原理为基础的三角形剖分近似法，对偏微分方程求得了数值解和误差估计，并在严密的数学基础上证明了其收敛性和稳定性。

有限单元法分析一般包括以下主要过程：

- (1) 前处理。建立实体模型，离散计算区域。
- (2) 有限单元分析。推导单元插值函数，进行单元分析，单元组装形成方程并求解。
- (3) 后处理。结果输出。

在岩石力学领域，与传统的极限平衡法等结构分析方法相比，有限单元法的优点主要有：

- (1) 能够模拟复杂地貌和地质条件。
- (2) 不必事先假定破坏面的形状或位置。
- (3) 考虑了变形协调条件和本构关系，保证了理论体系的严密性。
- (4) 可提供包括渗流、应力、变形等力学量的全部信息。

关于有限单元法，已有不少经典名著 (Oden, 1972; Desai, Abel, 1972; Gallagher, 1975; Zienkiewicz, 1977; Owen, Hinton, 1980; 朱伯芳, 1998)。本章将介绍有限单元法的基本理论与方法，目的是为后续各章提供背景知识。

第一节 应力应变分析的基本原理

有限单元法把连续介质转化为离散介质 (单元) 的组合，各单元通过结点联系，单元内位移由结点位移通过形函数插值获得，通过变分原理或虚功原理建立求解结点位移的联立方程，然后再用结点位移计算单元内应变，最后计算单元内应力。

采用时步增量型格式，第 n 时步 t (小时，天等) 的结点位移增量 $\{\Delta\delta\}_i$ 与单元内部位移增量 $\{\Delta u\}_i$ 分别为

$$\{\Delta\delta\}_i = [\Delta u_1 \quad \Delta v_1 \quad \Delta w_1 \quad \Delta u_2 \quad \Delta v_2 \quad \Delta w_2 \quad \dots]^T \quad (1-1-1)$$

$$\{\Delta u\}_i = [\Delta u \quad \Delta v \quad \Delta w]^T \quad (1-1-2)$$

单元内部的位移增量可以由结点位移增量通过形函数插值得到，即

$$\{\Delta u\}_i = [N]\{\Delta \delta\}_i \quad (1-1-3)$$

式中: $[N]$ 为单元形函数矩阵。

按小变形假定, 单元内部的应变增量为

$$\{\Delta \epsilon\}_i = [B]\{\Delta \delta\}_i \quad (1-1-4)$$

按弹性理论, 有

$$\begin{aligned} \{\Delta \sigma\}_i &= [D]\{\Delta \epsilon\}_i = [S]\{\Delta \delta\}_i \\ [S] &= [D][B] \end{aligned} \quad (1-1-5)$$

式中: $[D]$ 为弹性矩阵; $[B]$ 为应变矩阵; $[S]$ 为应力矩阵。

面力、体力等外荷载按静力等效原理分配到相关结点上, 有

$$\begin{aligned} \{\Delta F\}_i &= [\Delta F_{1x} \quad \Delta F_{1y} \quad \Delta F_{1z} \quad \Delta F_{2x} \quad \Delta F_{2y} \quad \Delta F_{2z} \quad \dots]^T \\ &= \iiint_{\Omega_i} [N]^T \{\Delta V\} d\Omega + \iint_{\Gamma_i} [N]^T \{\Delta p\} d\Gamma + [N]^T \{\Delta q\} \end{aligned} \quad (1-1-6)$$

式中: $\{\Delta V\}$ 、 $\{\Delta p\}$ 、 $\{\Delta q\}$ 分别为体力、面力和集中力增量向量。

根据虚功原理, 可推出平衡方程

$$\iiint_{\Omega_i} [B]^T \{\Delta \sigma\}_i d\Omega = \{\Delta F\}_i \quad (1-1-7)$$

把式 (1-1-5) 代入单元平衡方程 (1-1-7), 得到单元结点力与结点位移之间的关系, 即

$$[k]^e \{\Delta \delta\}_i = \{\Delta F\}_i \quad (1-1-8)$$

其中

$$[k]^e = \iiint_{\Omega_i} [B]^T [D] [B] d\Omega \quad (1-1-9)$$

式中: $[k]^e$ 为单元刚度矩阵。

利用式 (1-1-8), 通过绕结点组合, 即可给出全体结点位移增量与全体结点荷载增量的关系, 即

$$[K]\{\Delta \delta\}_i = \{\Delta F\}_i \quad (1-1-10)$$

式中: $[K]$ 为整体刚度矩阵; $\{\Delta \delta\}_i$ 为整体位移向量; $\{\Delta F\}_i$ 为整体荷载向量。

由式 (1-1-10) 解出位移增量, 代入式 (1-1-4) 计算各单元内部的应变增量, 再由式 (1-1-5) 计算各单元内部的应力增量。以上各量分别叠加后, 即可得出在某一时刻下结构的结点位移、单元应变和应力总量 $\{\delta\}_i$ 、 $\{\epsilon\}_i$ 、 $\{\sigma\}_i$ 。

以下各章节的讨论中, 在不引起误会的情况下, 各力学量的时间下标 t 均略去。

第二节 非线性问题

非线性问题可分为两类:

(1) 几何非线性。又称为大变形问题, 在数学上表现为: 应变矩阵 $[B]$ 是位移的函数, 即 $[B] = [B(\{u\}, \{\Delta u\})]$ 。

(2) 物理非线性。弹塑性问题典型的物理非线性问题, 在数学上表现为: $[D]$ 是应力的函数, 即 $[D] = [D^p(\{\sigma\}, \{\Delta \sigma\})]$ 。

下面介绍物理非线性问题中的弹粘塑性势理论。在时刻 t ，应变增量为

$$\{\Delta\epsilon\} = \{\Delta\epsilon^e\} + \{\Delta\epsilon^vp\} \quad (1-1-11)$$

式中： $\{\Delta\epsilon^e\}$ 为弹性应变增量； $\{\Delta\epsilon^vp\}$ 为粘塑性应变增量。

根据弹粘塑性势理论(Owen, Hinton, 1980)，有

$$\{\Delta\sigma\} = [\hat{D}](\{\Delta\epsilon\} - \{\dot{\epsilon}^vp\}\Delta t) \quad (1-1-12)$$

或

$$\{\Delta\epsilon\} = [\hat{D}]^{-1}\{\Delta\sigma\} + \{\dot{\epsilon}^vp\}\Delta t \quad (1-1-13)$$

其中

$$[\hat{D}] = ([D]^{-1} + [C])^{-1}$$

$$[C] = \Theta\Delta t[H]$$

$$[H] = \left[\frac{\partial \{\dot{\epsilon}^vp\}}{\partial \{\sigma\}} \right]$$

$$\{\dot{\epsilon}^vp\} = \gamma\langle F \rangle \left\{ \frac{\partial Q}{\partial \sigma} \right\}$$

式中： $[\hat{D}]$ 为隐式弹性矩阵； $\{\dot{\epsilon}^vp\}$ 为粘塑性应变率； Δt 为时间步长； $[H]$ 为隐式矩阵； γ 为流动参数； F 为屈服函数； Q 为势函数； Θ 为隐式参数。

当 $F=Q$ 时，称粘塑性流动是关联的，否则是非关联的。

当 $\Theta \geq 0.5$ 时，时步离散格式为无条件稳定。当 $\Theta = 0$ 时，时步离散格式为显式，此时

$$[\hat{D}] = [D] \quad (1-1-14)$$

式 (1-1-12) 退化为

$$\{\Delta\sigma\} = [D](\{\Delta\epsilon\} - \{\dot{\epsilon}^vp\}\Delta t) \quad (1-1-15)$$

显格式简单，但有稳定条件的限制，时间步长 Δt 过大会引起计算发散。

以下各章节的讨论中，在不引起误会的情况下，隐式弹性矩阵的记号“ $\hat{\quad}$ ”一概略去。

根据 Owen 和 Hinton 等人的研究 (1980)，若流动参数 γ 可由室内外试验确定，则可利用弹粘塑性计算推求应力应变随时间变化的实际过程，并求出最终的稳态应力应变；当流动参数 γ 无法确定时，可取 $\gamma=1$ ，由此计算的应力应变过程为虚拟过程，但最终求得的稳态应力应变与弹塑性解一致。

另据朱伯芳 (1998) 的研究，用弹塑性增量理论计算时，结构的荷载—位移曲线变化平缓，相应于失稳的一段曲线对荷载增量灵敏度不高，不易准确求出安全系数。而采用弹粘塑性势理论计算可避免这个缺点。

基于以上理由，笔者在进行计算岩体力学研究时，一般采用弹粘塑性势理论。

弹粘塑性势理论问题可用初应变法或初应力法求解。把式 (1-1-12) 代入单元平衡方程 (1-1-7)，代替弹性问题的式 (1-1-10)，有

$$[K]\{\Delta\delta\} = \{\Delta F\} + \{\Delta F^vp\} \quad (1-1-16)$$