

岩石力学与
工程研究著作

丛书

模拟节理岩体破坏 全过程的DDARF方法

◎焦玉勇 张秀丽 李廷春 著



科学出版社

www.sciencep.com

岩石力学与工程研究著作丛书

模拟节理岩体破坏全过程的 DDARF 方法

焦玉勇 张秀丽 李廷春 著

国家自然科学基金资助(批准号:50479071、40972201)

中国科学院武汉岩土力学研究所

岩土力学与工程国家重点实验室

自主研究项目重点课题资助(批准号:SKLZ08011)

科学出版社

北 京

TU45
J672

内 容 简 介

本书主要介绍作者在非连续介质力学框架中提出的模拟节理岩体破坏全过程的数值计算新方法——DDARF 的原理、公式、计算机实现和实例验证,并介绍了一种在 DDA 动力计算中行之有效的无反射边界的程序实现方法。

本书可作为土木、水电、桥梁、隧道、矿山、工程地质、国防等工科专业高年级本科生和研究生的教学参考书,也可供相关科研、设计和工程技术人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

模拟节理岩体破坏全过程的 DDARF 方法/焦玉勇,张秀丽,李廷春著.

—北京:科学出版社,2009

(岩石力学与工程研究著作丛书)

ISBN 978-7-03-026127-4

I. 模… II. ①焦…②张…③李… III. 节理—岩体—岩石破坏机理—数值模拟 IV. TU45

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2009)第 218054 号

责任编辑:王志欣 张 丽 / 责任校对:鲁 素

责任印制:赵 博 / 封面设计:鑫联必升

科学出版社 出版

北京东黄城根北街 16 号

邮政编码: 100717

<http://www.sciencep.com>

铭浩彩色印装有限公司 印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2010 年 1 月第 一 版 开本:A5(890×1240)

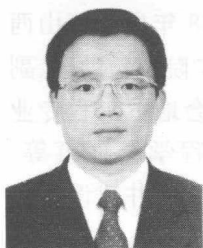
2010 年 1 月第一次印刷 印张:5

印数:1—1 500 字数:139 000

定价:40.00 元

(如有印装质量问题,我社负责调换)

作者简介



焦玉勇, 博士, 教授, 博士生导师。1968 年出生于山东邹平, 现任中国科学院武汉岩土力学研究所岩土力学与工程国家重点实验室责任研究员, 兼任中国岩石力学与工程学会(CSRME) 理事和副秘书长、CSRME 地下工程分会常务理事、CSRME 地面岩石工程专业委员会秘书长、湖北省岩石力学与工程学会常务理事、湖北省力学学会理事、《岩土力学》编委等。1992 年和 1995 年分获山东矿业学院采矿工程学士和安全工程硕士学位, 1998 年获中国科学院武汉岩土力学研究所岩土工程博士学位。毕业后留所工作至今, 历任助理研究员、副研究员、研究员, 期间 1999 年 7 月~2000 年 10 月参加中共中央组织部、团中央首批“博士服务团”; 2002 年 2 月~2004 年 9 月任新加坡南洋理工大学土木与环境工程学院 Research Fellow。主要从事破碎地层控制和岩土力学数值方法研究。主持国家自然科学基金 3 项、企业重大委托项目 5 项、岩土力学与工程国家重点实验室重点项目 2 项, 出版专著 1 部(合著)、译著 1 部(合译), 发表学术论文 50 余篇(其中, SCI 收录 12 篇, 被 SCI 引用 33 次, EI、ISTP 收录 20 余篇), 获国家版权局软件著作权登记 3 项。2008 年获中国岩石力学与工程学会青年科技奖银奖。



张秀丽, 女, 汉族, 1979 年 5 月 11 日出生于湖北南漳, 博士, 助理研究员。2002 年获武汉大学水利水电建筑工程学士学位, 2007 年获中国科学院武汉岩土力学研究所岩土工程博士学位, 2005 年作为 Visiting Student 赴新加坡南洋理工大学土木与环境工程学院学习交流半年。主要从事岩土力学数值计算、岩体破坏及动力冲击等方面的研究工作, 主持中国科学

院武汉岩土力学研究所创新工程 2007 年度青年人才领域前沿项目 1 项、岩土力学与工程国家重点实验室自主研究前沿探索性项目 1 项, 发表学术论文 10 余篇(其中, SCI 收录 2 篇, EI、ISTP 收录 8 篇)。



李廷春, 博士, 硕士生导师, 1968 年出生于山西朔州, 现任山东科技大学土木建筑学院院长助理、副教授, 兼任中国岩石力学与工程学会地下工程专业委员会理事、山东岩石力学与工程学会理事等。1991 年和 1997 年分获山东矿业学院矿井建设学士学位, 矿山建筑工程硕士学位, 2006 年获中国科学院武汉岩土力学研究所岩土工程博士学位。1991 年本科毕业后一直从事裂隙岩体力学特性和岩石工程爆破方面的教学与科研工作, 针对岩土工程稳定性分析、巷道支护设计、工程爆破、相似模拟试验、工程数值模拟等技术研究, 主持各类纵向项目 3 项, 主要参与 6 项, 完成企业重大委托项目 10 余项。获省级奖励 6 项。在《岩土工程学报》、《岩石力学与工程学报》、《岩土力学》等学术杂志发表论文 40 余篇, EI 收录 10 余篇, 著作 2 部, 发明专利 2 项。

《岩石力学与工程研究著作丛书》编委会

名誉主编: 孙 钧 王思敬 钱七虎 谢和平

主 编: 冯夏庭

副 主 编: 何满潮 黄润秋 周创兵

秘 书 长: 黄理兴 刘宝莉

编 委: (以姓氏汉语拼音字母顺序排列)

蔡美峰	曹 洪	戴会超	范秋雁	冯夏庭
高文学	郭熙林	何昌荣	何满潮	黄宏伟
黄理兴	黄润秋	金丰年	景海河	鞠 杨
康红普	李 宁	李 晓	李海波	李建林
李世海	李术才	李夕兵	李小春	李新平
廖红建	刘宝莉	刘汉东	刘汉龙	刘泉声
吕爱钟	栾茂田	莫海鸿	潘一山	任辉启
余诗刚	盛 谦	施 斌	谭卓英	唐春安
王 驹	王金安	王明洋	王小刚	王学潮
王芝银	邬爱清	徐卫亚	杨 强	杨光华
岳中琦	张金良	赵 文	赵阳升	郑 宏
周创兵	周德培	朱合华		

《岩石力学与工程研究著作丛书》序

随着西部大开发等相关战略的实施,国家重大基础设施建设正以前所未有的速度在全国展开:在建、拟建水电工程达 30 多项,大多以地下洞室(群)为其主要水工建筑物,如龙滩、小湾、三板溪、水布垭、虎跳峡、向家坝等,其中白鹤滩水电站的地下厂房高达 90m、宽达 35m、长 400 多 m;锦屏二级水电站 4 条引水隧道,单洞长 16.67km,最大埋深 2525m,是世界上埋深与规模均为最大的水工引水隧洞;规划中的南水北调西线工程的隧洞埋深大多在 400~900m,最大埋深 1150m。矿产资源与石油开采向深部延伸,许多矿山采深已达 1200m 以上。高应力的作用使得地下工程冲击岩压显现剧烈,岩爆危险性增加,巷(隧)道变形速度加快、持续时间长。城镇建设与地下空间开发、高速公路与高速铁路建设日新月异。海洋工程(如深海石油与矿产资源的开发等)也出现方兴未艾的发展势头。能源地下储存、高放核废物的深地质处置、天然气水合物的勘探与安全开采、CO₂ 地下隔离等已引起政府的高度重视,有的已列入国家发展规划。这些工程建设提出了许多前所未有的岩石力学前沿课题和亟待解决的工程技术难题。例如,深部高应力下地下工程安全性评价与设计优化问题,高山峡谷地区高陡边坡的稳定性问题,地下油气储库、高放核废物深地质处置库以及地下 CO₂ 隔离层的安全性问题,深部岩体的分区碎裂化的演化机制与规律,等等,这些难题的解决迫切需要岩石力学理论的发展与相关技术的突破。

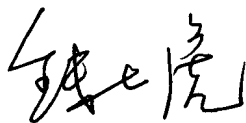
近几年来,国家 863 计划、国家 973 计划、“十一五”国家科技支撑计划、国家自然科学基金重大研究计划以及人才和面上项目、中国科学院知识创新工程项目、教育部重点(重大)与人才项目等,对上述科学与工程技术的攻克陆续给予了有力资助,并针对重大工程在设计 and 施工过程中遇到的技术难题组织了一些专项科研,吸收国内外的

优势力量进行攻关。在各方面的支持下,这些课题已经取得了很多很好的研究成果,并在国家重点工程建设中发挥了重要的作用。目前组织国内同行将上述领域所研究的成果进行了系统地总结,并出版《岩石力学与工程研究著作丛书》,值得钦佩、支持与鼓励。

该研究丛书涉及近几年来我国围绕岩石力学学科的国际前沿、国家重大工程建设中所遇到的工程技术难题的攻克等方面所取得的主要创新性研究成果,包括深部及其复杂条件下的岩体力学的室内、原位实验方法和技术,考虑复杂条件与过程(如高应力、高渗透压、高应变速率、温度-水流-应力-化学耦合)的岩体力学特性、变形破裂过程规律及其数学模型、分析方法与理论,地质超前预报方法与技术,工程地质灾害预测预报与防治措施,断续节理岩体的加固止裂机理与设计方法,灾害环境下重大工程的安全性,岩石工程实时监测技术与应用,岩石工程施工过程仿真、动态反馈分析与设计优化,典型与特殊岩石工程(海底隧道、深埋长隧洞、高陡边坡、膨胀岩工程等)超规范的设计与实践实例,等等。

岩石力学是一门应用性很强的学科。岩石力学课题来自于工程建设,岩石力学理论以解决复杂的岩石工程技术难题为生命力,在工程实践中检验、完善和发展。该研究丛书较好地体现了这一岩石力学学科的属性与特色。

我深信《岩石力学与工程研究著作丛书》的出版,必将推动我国岩石力学与工程研究工作的深入开展,在人才培养、岩石工程建设难题的攻克以及推动技术进步方面将会发挥显著的作用。



2007 年 12 月 8 日

《岩石力学与工程研究著作丛书》编者的话

近二十年来,随着我国许多举世瞩目的岩石工程不断兴建,岩石力学与工程学科各领域的理论研究和工程实践得到较广泛的发展,科研水平与工程技术能力得到大幅度提高。在岩石力学与工程基本特性、理论与建模、智能分析与计算、设计与虚拟仿真、施工控制与信息化、测试与监测、灾害性防治、工程建设与环境协调等诸多学科方向与领域都取得了辉煌成绩。特别是解决岩石工程建设中的关键性复杂技术疑难问题的方法,973、863、国家自然科学基金等重大、重点课题研究成果,为我国岩石力学与工程学科的发展发挥了重大的推动作用。

应科学出版社诚邀,由国际岩石力学学会副主席、岩石力学与工程国家重点实验室主任冯夏庭教授和黄理兴研究员策划,先后在武汉与葫芦岛市召开《岩石力学与工程研究著作丛书》编写研讨会,组织我国岩石力学工程界的精英们参与本丛书的撰写,来反映我国近期在岩石力学与工程领域研究取得的最新成果。本丛书内容涵盖岩石力学与工程的理论研究、试验方法、实验技术、计算仿真、工程实践等各个方面。出版时间计划为2007~2011年,分期分批出版。到2007年底,已有二十多本专著列入出版计划。

本丛书编委会编委由58位来自全国水利水电、煤炭石油、能源矿山、铁道交通、资源环境、市镇建设、国防科研、大专院校、工矿企业等单位与部门的岩石力学与工程界精英组成。编委会负责选题的审查,科学出版社负责稿件的审定与出版。

在本套丛书的策划、组织与出版过程中,得到了各专著作者与编委的积极响应;得到了各界领导的关怀与支持,中国岩石力学与工程学会理事长钱七虎院士特为丛书作序;中国科学院武汉岩土力学研究所冯夏庭、黄理兴研究员与科学出版社刘宝莉、沈建等编辑做了许多

繁琐而有成效的工作,在此一并表示感谢。

“21 世纪岩土力学与工程研究中心在中国”,这一理念已得到世人的共识。我们生长在这个年代里,感到无限的幸福与骄傲,同时我们也感觉到肩上的责任重大。我们组织编写这套丛书,希望能真实反映我国岩石力学与工程的现状与成果,希望对读者有所帮助,希望能为我国岩石力学学科发展与工程建设贡献一份力量。

《岩石力学与工程研究著作丛书》

编辑委员会

2007 年 11 月 28 日

序

岩体是一种充满了各种不连续面的地质材料,非连续变形是岩体变形破坏的主要特征之一。近半个世纪以来,为了抓住非连续变形这一本质特征,基于连续或非连续假设的各种数值方法应运而生。非连续变形分析(discontinuous deformation analysis, DDA)就是在这种背景下发展起来的一种用来模拟岩体非连续变形的新型数值方法。它将岩体视为由常应变可做刚体位移的块体单元组成,按块体总势能最小建立平衡方程,以位移、应变作为联立方程的未知量,把刚度、质量及荷载等子矩阵加到联立方程的系数矩阵上,通过求解类似于有限元法中的联立方程而得到不连续变形及至大变形大位移的唯一解。DDA 法为隐式解,块体的位移和本身的变形、静力和动力、正分析和反分析可通过方程组的求解统一得到解决。近年来,众多学者做了大量卓有成效的工作,使 DDA 不管是理论还是应用都有了飞速发展。

该书内容是对 DDA 方法应用领域的全新拓展。迄今,模拟岩体破坏的主导方法为 FEM、BEM 等连续类方法,它们是完全基于断裂力学分析的。研究单裂纹或几条裂纹的扩展可以得到精确解答,但遇到多裂纹汇交时,由于各自裂尖应力场的奇异性,求解会遇到数学上的困难。该书作者在 DDA 的框架中,提出了模拟岩体破坏全过程的 DDARF(discontinuous deformation analysis for rock failure)方法:采用 Monte Carlo 方法在计算区域内生成随机节理网络,进而自动生成三角形块体系统;采用 Weibull 分布模拟岩体的不均匀性;加入黏结算法,对块体剖分中产生的虚拟节理进行黏结处理以模拟连续区特性,通过破坏准则确定虚拟节理开裂为真实节理,从而实现裂纹沿块

体边界的扩展;同时加入块体开裂算法,用以模拟裂纹穿过块体的扩展。由于作者巧妙地利用了 DDA 计算非连续大位移不会遇到数学困难这一优点,DDARF 成功实现了模拟岩体裂纹萌生、扩展、贯通、破碎全过程,而且适用于连续、断续、离散任何情形,为模拟岩体破坏全过程开辟了一条新的途径。

作为 DDA 的始作俑者,本人为这一领域不断涌现出的新进展感到欣慰,很高兴将焦玉勇教授及合作者的研究成果推荐给岩石力学界的同仁们,希望 DDARF 能够更好地服务于岩体工程建设。



石根华

2009 年 9 月 9 日

前 言

我国正处于基础设施建设快速发展的时期，交通、矿山、水电、能源等领域出现了大量的岩体工程，数量众多、规模庞大。这些工程大多处于复杂的地质赋存环境下，其稳定和破坏不仅受围岩应力重构、岩石固有性质的影响，还受到地质结构如断层、节理等的控制。众所周知，岩体的断裂破坏除了与内部裂纹的萌生、扩展及贯通有关，原生断续裂纹开裂的贡献也不可小视。从计算机模拟的角度而言，现有的数值计算方法由于多基于连续介质力学理论，难以模拟出裂纹萌生、开叉、汇交等问题，更难在计算中考虑大量非贯通节理。本书基于非连续变形分析（discontinuous deformation analysis, DDA）方法，提出了一种新的计算机分析方法——DDARF（discontinuous deformation analysis for rock failure），用以模拟节理岩体破坏的全过程。

在 DDARF 中，采用 Monte Carlo 方法在计算区域内生成随机节理网络，在节理网络基础上，采用计算网格自动生成技术——行波法，将计算区域离散为细密的三角形块体系统，块体的力学参数采用 Weibull 分布，以模拟岩体的不均匀性；然后，加入黏结算法，对块体剖分过程中产生的虚拟节理（即连续区的块体边界）进行黏结处理，将虚拟节理两边的块体黏结起来，用以模拟连续区特性，而虚拟节理的黏结强弱可以直接通过黏结力来反映，其动态变化将决定裂纹沿块体边界的扩展，并加入块体内部的开裂算法，用以模拟裂纹穿过块体的扩展，这样，裂纹扩展就可以通过黏结失效和块体开裂而模拟出来。针对提出的算法，编制了相应的 C++ 程序模

块,加入到石根华教授的 DDA 程序中,形成了岩体裂纹扩展、破坏分析计算程序 DDARF。采用 DDARF 程序计算了大量的算例,分别模拟了单轴压缩、巴西圆盘、单轴拉伸、梁三点弯曲试验,研究了不同试件中的裂纹扩展情况,并分析了不同应力状态下的裂纹扩展规律。DDARF 计算结果与相关试验结果、其他数值方法模拟结果的吻合,验证了本书算法的正确性。最后,将 DDARF 方法应用到实际工程中,研究了复杂地质条件下的裂纹扩展情况及岩体破坏过程。应用结果表明,DDARF 不仅适用于岩体连续、断续、完全离散等任何情形,而且可以模拟裂纹萌生、扩展、贯通、直至岩体崩塌破坏的全过程。

此外,为了研究爆炸产生的应力波在节理岩体中的传播问题,在 DDA 中加入了一种新的边界条件——无反射边界,并研究了节理面对爆炸波传播的影响,以及爆炸波在节理岩体中的传播及衰减规律,为 DDARF 方法在岩体动力学领域的应用奠定了基础。

DDARF 是计算岩体力学大家庭的新成员,从思想的产生,理论框架的形成,到程序的开发,最后到成功的工程应用经历了近十年的时间,期间得到了 DDA 方法创始人石根华教授一如既往的支持,并无私地提供了源程序。国家自然科学基金项目(批准号:50479071、40972201)和中国科学院武汉岩土力学研究所岩土力学与工程国家重点实验室自主研究项目重点课题(批准号:SKLZ08011)对 DDARF 的资助是这项研究走向成功的重要后盾。第一作者的恩师葛修润院士、师兄郑宏研究员,中国科学院武汉岩土力学研究所李海波研究员、陈卫忠研究员、刘泉声研究员、盛谦研究员、冯夏庭研究员、黄理兴研究员,以及山东大学朱维申教授、李术才教授、张强勇教授等在 DDARF 的成长过程中给予了极大的关心和帮助,在此一并表示感谢。

本书是作者这些年来研究成果的阶段性的总结,也是下一步工作

的开端，希望本书的问世能够起到抛砖引玉的作用，使基于非连续介质力学的岩体破坏过程模拟方法发扬光大，成为服务于岩体工程建设的有力工具。

虽然作者很努力、很谨慎地完成 DDARF 的初步研究和总结工作，但由于水平限制，本书无论在内容还是形式上肯定存在不足之处，敬请各位同仁不吝赐教。

作 者

2009 年 9 月 18 日于武汉

目 录

《岩石力学与工程研究著作丛书》序

《岩石力学与工程研究著作丛书》编者的话

序

前言

第一章 绪论	1
第二章 DDA 方法的基本原理	9
2.1 完全一阶近似	9
2.2 联立方程组	10
2.3 运动学条件	12
2.4 各项势能极值分析	13
2.4.1 弹性应力	13
2.4.2 初始应力	14
2.4.3 点荷载	15
2.4.4 体积荷载	15
2.4.5 预应力锚杆	16
2.4.6 惯性力	17
2.4.7 点位移约束	18
2.4.8 法向弹簧约束	19
2.4.9 切向弹簧约束	21
2.4.10 摩擦力	22
第三章 断续节理岩体破坏分析模型	24
3.1 随机节理网络自动生成方法	24
3.1.1 Monte Carlo 方法	25
3.1.2 生成随机节理网络	27
3.1.3 算法实现及算例	28

3.2	三角形块体单元自动生成方法	29
3.2.1	增设虚拟节理	30
3.2.2	搜索单连通子域	31
3.2.3	划分三角形块体单元	32
3.2.4	算法实现过程	34
3.3	模型建立实例	35
3.4	本章小结	37
第四章	块体边界开裂分析方法	39
4.1	块体间的黏结算法	39
4.1.1	黏结算法及其失效判断	39
4.1.2	算法实现及数值算例	40
4.2	块体间黏结算法的改进	54
4.2.1	黏性裂纹模型	54
4.2.2	黏结算法改进	55
4.2.3	算法实现及算例验证	59
4.3	材料不均匀性的模拟	63
4.3.1	Weibull 分布	63
4.3.2	程序实现及算例	65
4.4	块体边界开裂分析实例	66
4.4.1	单轴压缩试验模拟	66
4.4.2	巴西圆盘试验模拟	80
4.4.3	单轴拉伸试验模拟	85
4.4.4	三点弯曲试验模拟	87
4.5	本章小结	89
第五章	块体边界开裂分析方法的工程应用	91
5.1	边坡工程地质条件	91
5.1.1	地形地貌	91
5.1.2	地层岩性	93
5.1.3	断层及深部裂缝	94
5.2	边坡失稳模式分析	94