



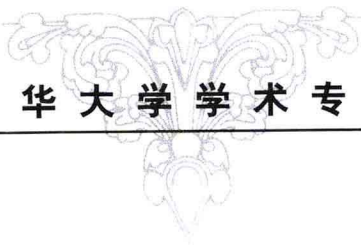
清华大学学术专著

岩石和混凝土 离散—接触—断裂分析

张楚汉 金峰 等著



清华大学出版社



清华大学学术专著

岩石和混凝土 离散—接触—断裂分析

张楚汉 金峰 侯艳丽 周元德 著

清华大学出版社

北京

内 容 简 介

本书介绍了当前国内外在岩石和混凝土力学数值模型方面的最新成就,总结了作者 20 余年在岩石和混凝土介质离散-接触-断裂分析方面的研究成果,并结合我国实际,阐述了在高坝与地基安全分析中的工程应用实例。主要内容包括:(1)岩石和混凝土非连续介质数值方法,包括离散元法、刚体弹簧元法、非连续变形分析法等;(2)岩石和混凝土非连续界面的接触力学模型;(3)岩石和混凝土非线性断裂模型,包括弥散裂缝模型与分离裂缝模型;(4)岩石和混凝土离散元与非线性断裂的耦合模型;(5)岩石和混凝土结构与地基安全分析的工程应用,包括岩质边坡的卸荷蠕变,边坡地震动力稳定,高坝断裂分析与高坝地基破坏过程仿真等。

本书可供岩土与结构工程师与研究工作者在从事岩土地基与混凝土结构工程设计计算中应用参考,也可供高等院校土木、水利工程的教师、研究生教学参考。

版权所有,侵权必究。侵权举报电话:010-62782989 13701121933

图书在版编目(CIP)数据

岩石和混凝土离散-接触-断裂分析/张楚汉,金峰等著. —北京:清华大学出版社,2008.10
(清华大学学术专著)

ISBN 978-7-302-18176-7

I. 岩… II. ①张… ②金… III. ①岩石力学:断裂力学—研究 ②混凝土结构—断裂力学—研究 IV. TU45

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2008)第 104947 号

责任编辑:汪亚丁

责任校对:刘玉霞

责任印制:杨 艳

出版发行:清华大学出版社

地 址:北京清华大学学研大厦 A 座

<http://www.tup.com.cn>

邮 编:100084

社 总 机:010-62770175

邮 购:010-62786544

投稿与读者服务:010-62776969, c-service@tup.tsinghua.edu.cn

质 量 反 馈:010-62772015, zhiliang@tup.tsinghua.edu.cn

印 装 者:北京铭成印刷有限公司

经 销:全国新华书店

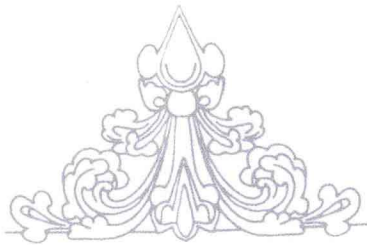
开 本:185×260 印 张:34.25 插 页:2 字 数:832 千字

版 次:2008 年 10 月第 1 版 印 次:2008 年 10 月第 1 次印刷

印 数:1~2500

定 价:80.00 元

本书如存在文字不清、漏印、缺页、倒页、脱页等印装质量问题,请与清华大学出版社出版部联系调换。联系电话:(010)62770177 转 3103 产品编号:023168-01



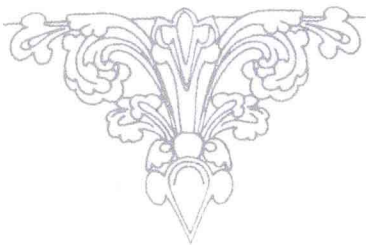
作者简介

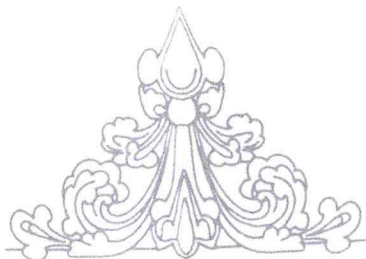


张楚汉 男，广东梅州人，1933年生，1957年清华大学水利工程系本科毕业，1965年清华大学水利工程系研究生(四年制)毕业，1978—1981年美国加州大学伯克利分校任访问学者。中国科学院院士，清华大学水利水电工程系教授，美国土木工程师协会会员，加拿大Concordia大学兼职客座教授，中国力学学会荣誉会员，中国水利学会名誉理事，水利部科技委委员，国家自然科学基金会工程材料学部咨询委员兼水利学科评审组组长(2002—2005年)。长期从事水工结构工程与抗震研究，主持完成了三峡、二滩、小湾、溪洛渡、锦屏、拉西瓦、大岗山、向家坝等30多项高坝工程静动力安全关键技术研究。发表论文180余篇，SCI收录30篇，SCI他引130余篇次，与合作者撰写专著3部，其中*Numerical Modeling of Concrete Dam Foundation Reservoir Systems*为英文版清华大学学术专著。获国家自然科学三等奖，全国科学大会奖，国家优秀教学成果一等奖，国家教委科技进步一等奖、二等奖，电力部科技进步二等奖等共9项。已指导博士生20余名获得博士学位。



金 峰 男，贵州遵义人，1966年生，1987年清华大学水利工程系本科毕业，1992年清华大学水利水电工程系博士研究生毕业，获工学博士学位。清华大学水利水电工程系教授，博士生导师。水沙科学与水利水电工程国家重点实验室高坝结构首席研究员，清华—前田先进建设技术研究中心主任，清华大学学位委员会委员兼水利工程学位分委员会主席。主要从事水工结构高坝抗震，结构分析以及新型混凝土等研究，已发表论文150余篇。近年来主持的项目有：国家自然科学基金重点项目“西部强震区高拱坝抗震功能设计的若干基础理论研究”，以及小湾、溪洛渡、锦屏、二滩、拉西瓦、构皮滩、大冈山、白鹤滩、金安桥等重大水利枢纽的科技攻关研究。获国家自然科学三等奖，国家教育科技进步一等奖、二等奖，天津市自然科学三等奖等多项科技奖励；还获得教育部高等学校优秀青年教师奖，北京市高等学校教学名师奖、北京市茅以升青年科技奖，水利部青年科技英才奖等多项个人奖励。已申请专利7项。已指导博士生5名获得博士学位。





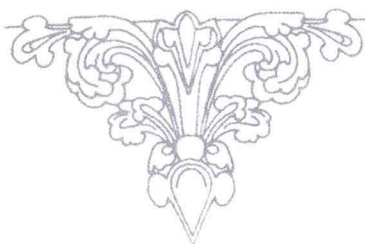
作者简介



侯艳丽 女，内蒙古赤峰人，1977年生，2000年清华大学水利水电工程系本科毕业，2006年清华大学水利水电工程系博士研究生毕业，获工学博士学位。主要从事非连续数值方法在水工结构及岩石力学领域中的应用研究。



周元德 男，广东惠州人，1975年生，1999年清华大学水利水电工程系本科毕业，2004年清华大学水利水电工程系博士研究生毕业，获工学博士学位。2006年至今于香港大学土木工程系做博士后研究工作。主要从事水工结构，岩土力学与工程相关方向的研究，已发表论文20余篇。



前 言

1985年3月我参加清华大学土木水利工程赴美考察组,首站访问了Minnesota大学土木与环境工程系,听到该校Peter Cundall博士介绍他发明的大变形非连续分析的“离散单元法”(discrete element method),当时觉得十分新颖。兴奋之余,旋即开始指导研究生学习这一方法,并结合岩石地基与混凝土高坝结构的离散-接触-断裂这一三位一体的问题开展研究,期望将它应用于我国高坝地基、边坡稳定安全分析中,迄今已有20余年了。在这期间,国际国内在岩石和混凝土力学方面的研究已取得了长足的进展:连续与非连续介质力学的数值模拟逐渐朝统一模型的目标前进了一大步;岩石混凝土结构地基从小变形分析到大变形失稳破坏的仿真已成为可能。与此同时,我组在学习—研究—创新—实践的思想指导下,研究工作也取得了一些初步成果,包括岩石和混凝土的离散-接触-断裂分析模型以及我国高坝结构地基与边坡的静动力安全稳定分析两个方面。现在,总结这些成果,集成一书出版,定名为《岩石和混凝土离散-接触-断裂分析》(*Discrete-Contact-Fracture Analysis of Rock and Concrete*),以就教于从事岩石力学、混凝土力学的学者以及土木水利工程界的同仁们。

本书是一部集体研究成果的总结,其中有金峰教授、王光纶教授和我共同指导并参加完成本书研究工作的学生们,除侯艳丽博士、周元德博士外,还有鲁军、崔玉柱、张冲、尹显俊、方修君、龙渝川等博士,以及陈昌伟、王刚、周庆科、邵炜等;此外,徐艳杰、王进廷副教授在研究与写作过程中也提出了宝贵的建议;汪亚丁女士认真细致的编辑工作,唐欣薇、辛海丽协助书稿的整理与校对等,在此均一并致以谢忱。

由于我们理论与学识水平所限,谬误与不足之处在所难免,诚恳地希望来自各方面的批评与指正。

张楚汉

2008年2月于清华园

目 录

第 1 章 绪论	1
1.1 岩石和混凝土材料结构的力学特征	1
1.2 岩石和混凝土力学离散-接触-断裂问题	3
1.2.1 介质离散	3
1.2.2 岩石和混凝土的接触力学模型	4
1.2.3 岩石和混凝土非线性断裂行为	4
1.2.4 岩石和混凝土的应变软化与局部化的损伤断裂特征	5
1.3 岩石和混凝土结构分析的计算数值方法	7
1.3.1 连续介质力学方法	7
1.3.2 非连续介质力学方法	10
1.4 岩石和混凝土力学的前沿问题	13
1.5 本书的框架与内容简介	16
参考文献	17
第 2 章 介质离散几何切割方法与算法	23
2.1 概述	23
2.2 表征空间多面体的拓扑关系与数据结构	24
2.2.1 空间多面体的拓扑关系	24
2.2.2 空间多面体的数据结构	25
2.3 自动剖分算法的基本思想及实现	27
2.3.1 自动剖分算法的基本思想	27
2.3.2 新交点与新有向边的生成	27
2.3.3 环路搜索	30
2.3.4 有向面生成	32
2.3.5 体的搜索	33
2.4 空间多面体自动剖分实例	34
2.4.1 用空间平面(视为无限大)切割	34
2.4.2 用有界空间平面切割凹多面体岩块	36
参考文献	38

第3章 二维变形体离散单元法	39
3.1 概述	39
3.2 二维变形体离散元基本原理	40
3.2.1 接触检索和接触本构关系	40
3.2.2 变形块体本构关系	42
3.2.3 节点动力平衡方程	44
3.2.4 二维变形体离散单元法的基本数据结构	45
3.2.5 二维变形体离散单元法的基本算法	48
3.3 二维变形体离散单元法中地应力的模拟	52
3.4 有限差分三角形网格的自动剖分	53
3.4.1 数据结构	54
3.4.2 算法描述	54
3.4.3 有效性测试和参数选择	56
3.5 二维变形体离散单元法模型的数值模型与试验验证	57
3.5.1 刚性块体激振试验	57
3.5.2 砌石拱的稳定分析	58
参考文献	61
第4章 二维变形体离散单元法的扩展	62
4.1 离散元流变模型	62
4.1.1 岩石和岩体的流变特性	62
4.1.2 岩石流变模型概述	63
4.1.3 考虑结构面流变的离散单元模型	65
4.2 离散元结构-渗流耦合模型	69
4.2.1 离散元渗流模型的基本思路	69
4.2.2 裂隙网络渗流模型的计算	70
4.2.3 饱和/非饱和渗透系数的确定	72
4.2.4 渗流场与应力场的耦合	74
4.2.5 离散元结构-渗流耦合模型的计算流程	77
4.3 二维离散单元法扩展模型的数值与试验验证	78
4.3.1 离散元结构面蠕变力学性能验证	78
4.3.2 离散元结构面应力松弛力学性能验证	81
4.3.3 离散元饱和/非饱和渗流模型在正交网络渗流试验中的验证分析	82
参考文献	88
第5章 基于变形等效的离散元——刚体弹簧元方法	90
5.1 概述	90
5.2 空间多面体的几何与物理特性参数描述	91

5.2.1	体积和形心	91
5.2.2	惯性张量	92
5.3	空间凸多面体接触检索	93
5.3.1	空间凸多面体接触关系分类	93
5.3.2	空间多面体角边修圆	94
5.3.3	接触关系检索	95
5.4	三维刚体弹簧元方法基本力学原理	99
5.4.1	块体接触模型及接触力分析	99
5.4.2	块体的运动分析	101
5.4.3	块体几何参量更新	103
5.4.4	三维刚体弹簧元方法等效原则	105
5.5	三维刚体弹簧元方法程序实现	107
5.5.1	动态顺序线性链表	107
5.5.2	主要数据结构	108
5.6	三维刚体弹簧元方法模型的数值验证	109
5.6.1	悬臂梁受均匀荷载作用	109
5.6.2	拱圈受均匀径向荷载作用	112
	参考文献	114
第 6 章	三维变形体离散元法	116
6.1	概述	116
6.2	空间凸多面体接触检索	117
6.2.1	接触检索粗判	117
6.2.2	接触检索细判——公共面接触检索方法	118
6.3	三维变形体离散元法基本原理	120
6.3.1	接触模型和接触力分析	120
6.3.2	变形块体弹性应力与节点力	121
6.3.3	节点动力平衡方程	123
6.3.4	参数选取分析	123
6.3.5	简单算例	131
6.4	三维变形体离散元法数据结构	131
6.4.1	块体数据结构	131
6.4.2	接触数据结构	133
6.5	三维变形体离散元法的网格自动剖分	135
	参考文献	136
第 7 章	三维模态变形体离散元方法	139
7.1	模态变形体离散元的运动学描述	139
7.1.1	刚体运动	140

7.1.2 变形	142
7.2 模态变形体离散元方法	145
7.2.1 块体的空间平动	146
7.2.2 块体的转动	148
7.2.3 块体的变形	150
7.3 接触力求解	157
7.3.1 点接触模型	158
7.3.2 面接触模型	159
7.4 求解流程	160
7.5 模态变形体离散元对变形模拟的验证算例	161
7.5.1 简单模态变形体离散元的计算	161
7.5.2 二阶模态变形体离散元的计算	162
7.6 模态变形体离散元对离散块体运动模拟的验证算例	164
7.7 梅花拱坝破坏过程仿真算例	166
7.7.1 模型的建立	166
7.7.2 有限元与三维模态变形体离散元计算比较	167
7.7.3 梅花拱坝破坏过程仿真	173
参考文献	174
第8章 其他非连续介质力学方法	175
8.1 颗粒体离散元法(PFC)	175
8.1.1 三维颗粒体离散元接触模型和接触力分析	176
8.1.2 运动分析	181
8.1.3 颗粒材料的应力-应变分析	184
8.1.4 颗粒体离散元应用实例	186
8.2 非连续变形分析方法	188
8.2.1 非连续变形分析理论概要	189
8.2.2 二维非连续变形分析	190
8.2.3 三维非连续变形分析	198
参考文献	203
第9章 岩体结构面接触本构关系	207
9.1 概述	207
9.2 岩体结构面二维本构模型	207
9.2.1 法向单调加载本构模型	208
9.2.2 法向循环加载本构模型	208
9.2.3 切向单调加载本构模型	210
9.2.4 切向循环加载本构模型	210
9.2.5 二维接触刚度矩阵	215

9.2.6	屈服准则与加、卸载准则	218
9.2.7	模型验证	219
9.3	岩体结构面三维循环加载本构模型	221
9.3.1	岩体结构面三维剪切特性	222
9.3.2	切向循环加载本构模型	223
9.3.3	三维接触刚度矩阵	225
9.3.4	屈服准则与加、卸载准则	227
9.3.5	模型参数	229
9.3.6	模型验证	229
	参考文献	231
第 10 章	岩石和混凝土结构面的接触数值模型	233
10.1	概述	233
10.1.1	等效连续模型	233
10.1.2	接触边界模型	234
10.1.3	接触单元模型	239
10.1.4	不同结构面分析力学模型的评价	240
10.2	模拟接触面的薄层单元模型	241
10.2.1	本构关系	241
10.2.2	接触面变形模式	242
10.3	薄层单元的混合迭代求解	242
10.3.1	非线性问题的求解方法	242
10.3.2	接触面超余应力调整	243
10.3.3	接触面嵌入调整	244
10.3.4	非线性混合迭代	244
10.4	薄层单元模型的动力分析	245
10.4.1	Newmark 增量法	245
10.4.2	非线性动力时程分析	245
10.5	模型的验证	246
10.5.1	嵌入调整算例	246
10.5.2	滑块算例	246
10.5.3	土中埋管算例	247
	参考文献	250
第 11 章	准脆性材料非线性断裂力学	253
11.1	概述	253
11.2	准脆性材料的损伤断裂机理	254
11.2.1	准脆性材料特征应力-应变关系	254
11.2.2	准脆性材料的损伤断裂机理与破坏特征	255

11.3	准脆性材料经典断裂力学	258
11.3.1	线弹性断裂力学简介	259
11.3.2	修正的线弹性断裂力学模型	261
11.4	准脆性材料非线性断裂力学的发展	262
11.4.1	分离式裂缝模型的发展——虚拟裂缝模型	262
11.4.2	弥散式裂缝模型的发展——钝断裂带模型	264
11.4.3	非线性断裂力学模型基本要素	266
	参考文献	270
第 12 章	弥散式断裂带裂缝模型(一)——固定裂缝模型	274
12.1	概述	274
12.2	弥散式裂缝模型的有限元平衡方程	275
12.3	传统弥散式裂缝模型简介	277
12.4	基于全量关系描述的固定裂缝模型	278
12.4.1	本构模型	278
12.4.2	切线刚度矩阵	280
12.4.3	折减系数定义与加、卸载准则	280
12.4.4	基于增量关系描述的固定裂缝模型	282
12.4.5	折减系数演化描述	283
12.4.6	增量、全量关系两类模型比较分析	284
12.5	数值算例	286
12.5.1	单轴拉伸构件试验模拟	286
12.5.2	单边裂纹紧凑拉伸构件试验模拟	288
	参考文献	291
第 13 章	弥散式断裂带裂缝模型(二)——旋转裂缝模型	292
13.1	概述	292
13.2	旋转裂缝模型	293
13.2.1	本构模型	293
13.2.2	切线刚度矩阵	295
13.2.3	折减系数演化描述	300
13.2.4	唯一解要求与应力锁现象分析	300
13.3	固定裂缝与旋转裂缝模型比较分析	307
13.3.1	固定裂缝模型基本力学特征	307
13.3.2	旋转裂缝模型基本力学特征	308
13.3.3	固定、旋转裂缝模型比较分析	309
13.4	数值模拟算例	310
13.4.1	楔入劈拉试验数值模拟	310
13.4.2	四点剪切梁试验数值模拟	313

参考文献	316
第 14 章 分离式裂缝模型	318
14.1 概述	318
14.2 分离式裂缝模型的基本概念	319
14.2.1 分离式裂缝模型的基本力学方程	319
14.2.2 分离式裂缝的离散网格	320
14.3 虚拟裂缝模型	321
14.3.1 虚拟裂缝模型的数值实现	322
14.3.2 软化力学行为描述	328
14.4 内聚力裂缝模型	329
14.4.1 界面基本变形力学特征	329
14.4.2 内聚力裂缝模型的数值实现	330
14.5 数值模拟算例	334
14.5.1 单边切口非对称弯梁试验数值模拟	335
14.5.2 单边切口四点剪切梁试验数值模拟	338
参考文献	340
第 15 章 非局部化损伤断裂模型	343
15.1 概述	343
15.2 非局部化模型概述	344
15.2.1 积分型非局部化模型	344
15.2.2 梯度模型	346
15.2.3 积分型非局部化与梯度模型比较	348
15.3 积分型非局部化损伤模型	349
15.3.1 非局部化损伤模型的数学描述	349
15.3.2 一致切线刚度矩阵的推导	351
15.3.3 算例分析	353
15.4 梯度损伤模型	355
15.4.1 梯度损伤模型基本方程	356
15.4.2 梯度损伤模型的增量迭代求解	357
15.4.3 算例分析	358
参考文献	361
第 16 章 岩石和混凝土断裂分析的扩展有限元法	365
16.1 概述	365
16.2 基本原理	366
16.2.1 单位分解	366
16.2.2 扩展有限元法	367

16.3	扩展有限元法的控制方程	368
16.3.1	扩展有限元法的控制方程	369
16.3.2	非连续界面相互作用在扩展有限元法中的实现	370
16.4	数值积分及程序实现	372
16.4.1	预设虚节点法	372
16.4.2	程序实现	373
16.4.3	数值积分	375
16.5	数值算例	376
16.5.1	三点弯梁开裂过程模拟	376
16.5.2	单边切口四点剪切梁开裂过程模拟	379
16.5.3	水力劈裂过程模拟	383
	参考文献	391
第 17 章	三维变形体离散元法与弥散式裂缝模型的耦合	395
17.1	概述	395
17.2	三维变形体离散元与弥散裂缝模型的耦合实现	395
17.2.1	弥散裂缝模型简介	395
17.2.2	弥散裂缝模型与离散元法的耦合	397
17.3	数值模拟算例	402
17.3.1	岩石和混凝土材料 I 型开裂	402
17.3.2	岩石和混凝土材料 I / II 混合型开裂	404
	参考文献	409
第 18 章	三维变形体离散元法与分离裂缝模型的耦合	411
18.1	概述	411
18.2	三维变形体离散元法与分离裂缝模型的耦合实现	412
18.2.1	I 型分离裂缝模型	413
18.2.2	弥散裂缝模型和分离裂缝模型的等价性比较	414
18.2.3	I / II 混合型分离裂缝模型	416
18.2.4	分离裂缝模型与离散元的耦合	419
18.3	数值模拟算例	420
18.3.1	准脆性材料 I 型开裂模拟	421
18.3.2	准脆性材料 I / II 混合型开裂模拟	424
	参考文献	426
第 19 章	离散元法在岩质边坡稳定分析中的应用	428
19.1	概述	428
19.2	离散元蠕变模型在三峡船闸高边坡工程的应用	429
19.2.1	工程概况	429

19.2.2	三峡船闸高边坡的基本计算条件	429
19.2.3	三峡船闸高边坡卸荷变形及稳定分析	436
19.3	离散元法在三峡船闸高边坡动力稳定分析中的应用	443
19.3.1	计算条件	443
19.3.2	三峡船闸高边坡的动力响应和稳定性分析	444
19.4	离散元饱和/非饱和渗流模型在龙滩水电站边坡稳定分析中的应用	447
19.4.1	工程概况	447
19.4.2	工程地质及水文地质条件	447
19.4.3	计算条件	449
19.4.4	龙滩水电站边坡渗流与稳定分析	452
	参考文献	458
第 20 章	离散-断裂模型在高坝-地基破坏分析中的应用	459
20.1	概述	459
20.2	应用刚体弹簧元法进行玛尔帕塞拱坝破坏仿真分析	460
20.2.1	玛尔帕塞拱坝	460
20.2.2	玛尔帕塞拱坝失稳机理的研究	464
20.3	应用三维变形离散元法研究拱坝-地基系统整体抗滑稳定	479
20.3.1	溪洛渡拱坝介绍及计算模型	479
20.3.2	溪洛渡拱坝-地基系统静力抗滑稳定分析	482
20.4	应用离散-断裂耦合模型分析 Koyna 重力坝动力破坏	498
20.4.1	非线性断裂力学的动力计算模型	498
20.4.2	工程概况及已有的相关研究	499
20.4.3	线弹性动力计算	501
20.4.4	Koyna 坝动力破坏过程分析	503
	参考文献	508
第 21 章	应用非线性断裂力学模型分析 Kölnbrein 拱坝坝踵开裂	510
21.1	概述	510
21.2	工程概况和开裂行为	510
21.3	已有的相关研究及评论	512
21.4	计算模型及方法	513
21.4.1	计算模型及工况	513
21.4.2	断裂模型及计算方法	515
21.5	计算结果的分析比较	515
21.5.1	三维旋转裂缝模型计算结果	515
21.5.2	三维固定裂缝模型计算结果	518
21.5.3	计算结果比较分析	520
	参考文献	521

第 22 章 应用接触模型分析重力坝静动力抗滑稳定	523
22.1 工程概况与计算模型	523
22.1.1 工程概况	523
22.1.2 数值计算模型	523
22.1.3 计算荷载与加载方式	524
22.1.4 计算参数	525
22.2 静力分析	526
22.3 动力分析	530
22.4 安全系数的讨论	533
22.5 小结	534
参考文献	534

第 1 章 绪论

1.1 岩石和混凝土材料结构的力学特征

对岩石和混凝土作为天然与人工准脆性材料的力学行为研究是现代计算固体力学中一个极具挑战性的领域。岩石和混凝土组成的工程结构,如高坝、桥梁、海洋平台、核电站、隧道、地下厂房、坑道以及它们的地基基础、边坡等,是人类基础设施建设中重要的组成部分。自 20 世纪 70 年代以来,人们对岩石和混凝土及其工程结构的研究和认知经历了从线弹性力学发展到非线性、弹塑性、损伤断裂力学;从连续介质力学发展到非连续介质的离散力学;从均质各向同性介质发展到非均质各向异性介质;从小变形假设发展到大变形破坏过程仿真;从宏观力学模型到探索细观(微观)力学行为的机理以及建立两者之间的等效关系。上述诸方面的长足进展主要依赖于现代计算技术水平的迅速发展以及数学、物理、化学等基础学科和地质、岩土、材料、流体力学、固体力学、试验力学等应用与工程学科的进步。岩石和混凝土材料及其工程结构力学行为研究的主要特征有:天然岩体中的断层、节理、裂隙随机分布,其几何与力学参数具有统计特征,混凝土结构中的微裂缝组成也具有类似特点。由于这些非连续结构面具有一定的连通率,它们是属于连续与离散(或局部离散)的耦合介质,岩石、混凝土结构如高坝、水电站、海岸工程、地下工程等处于水体与渗流环境中,一般属于饱和或非饱和渗流与岩体、混凝土结构的多相耦合问题。由于岩体的层状构造与结构面产状的方向性,岩体具有各向异性,对碾压式混凝土也具有成层各向异性特征。天然岩体在长期地质与水文环境下产生的微裂纹、缺陷以及混凝土在自身变形与温度荷载作用下骨料界面存在着初始微裂纹损伤,这类材料在破坏机制上存在局部化现象,并导致应变软化的本构特征。因此岩石和混凝土结构的力学行为从小变形到大变形的全过程仿真涉及材料本构关系模型的合理选择、损伤断裂模拟、界面接触检索方法与有效的计算求解技术等,只有综合解决上述关键技术才能合理地进行岩石和混凝土结构的破坏过程仿真。

作为准脆性材料的岩石和混凝土,由于存在天然或人为的内在微缺陷,如裂隙、夹杂、气泡、孔穴等,其破坏特征表现为断裂的突发性。在裂缝扩展前,一般不存在明显的裂尖塑性区,裂缝的扩展主要表现为微裂隙的连通,汇集而形成宏观裂缝的发展过程。概括起来,岩石和混凝土材料的力学性能主要有如下特征。

(1) 岩石和混凝土具有明显应变软化特性。岩石和混凝土材料的应力-应变关系在超过峰值强度后呈下降趋势,称为应变软化现象。这一现象主要与材料的非均匀性与变形局部化相关,表现为材料在受载变形过程中,经历一定量的均匀变形后,突然产生高度局部化