

*Introduction to Generalized Multi-field Coupling Analysis
for Complex Rock Masses*

复杂岩体 多场广义耦合分析 导论

周创兵 陈益峰 姜清辉 卢文波 著



中国水利水电出版社
www.waterpub.com.cn

复杂岩体 多场广义耦合分析 导论

周创兵 陈益峰 姜清辉 卢文波 著



中国水利水电出版社
www.waterpub.com.cn

内 容 提 要

本书以岩体多场广义耦合理论与应用为主题,重点阐述岩体多场耦合机理和耦合模型,提出了考虑结构面峰后力学特性的界面层模型、考虑结构面渗流与变形耦合的广义立方定理,探讨了岩体表征单元体(REV)分析方法及岩体力学参数取值方法,论述了岩体多场耦合的工程作用效应,系统介绍了岩体应力场、渗流场及其耦合的数值模拟方法。本书立足于岩体地质特征与赋存环境研究,注重岩体多场耦合工程作用效应研究,强调岩体多场耦合的模型选择与参数选取;在论述岩体多场耦合机理与数值模拟方面,既以作者及团队的研究成果为主,又力图兼顾国内外的研究现状与主要成果。

本书适用于水利、水电、交通、矿山、石油、核废料处置等行业从事岩石力学和岩土工程的科研人员使用,也可作为高等院校和科研院所相关专业研究生的教学参考书。

图书在版编目(CIP)数据

复杂岩体多场广义耦合分析导论/周创兵等著. —北京:
中国水利水电出版社, 2008
ISBN 978-7-5084-6100-7

I. 复… II. 周… III. 岩体—耦合—分析 IV. TU45

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2008) 第 187612 号

书 名	复杂岩体多场广义耦合分析导论
作 者	周创兵 陈益峰 姜清辉 卢文波 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)、68367658 (营销中心)
经 售	北京科水图书销售中心(零售) 电话: (010) 88383994、63202643 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	北京中科印刷有限公司
规 格	184mm×260mm 16开本 24.25印张 575千字
版 次	2008年12月第1版 2008年12月第1次印刷
印 数	0001—3000册
定 价	68.00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

岩石力学是力学、地学与工程科学交叉形成的一门学科分支。岩体多场耦合又是岩石力学近 20 年来形成的一个研究方向。笔者涉及岩体多场耦合问题是在 1991 年,当时师从熊文林教授攻读博士学位,与导师一起承担国家“八五”科技攻关项目子题“裂隙岩体渗流场及其与应力场耦合分析”。这一研究方向当时在国内刚刚起步,即使在国际岩石力学界也算是学术前沿问题。1991~1996 年的研究仅限于岩体渗流与应力耦合机理、耦合模型及耦合过程有限元模拟。1997~1999 年与叶自桐教授合作承担国家自然科学基金项目“裂隙岩体非饱和渗流机理”,开始涉及非饱和渗流过程中的渗流与应力耦合问题,并结合三峡工程、小湾工程、水布垭工程等开展裂隙岩体渗流场与应力场耦合分析的应用研究。2000 年以后,笔者主持和参与国家自然科学基金重点项目“裂隙岩体渗流与力学特性”(50239070)、雅砻江水电开发联合基金重点项目“西南地区复杂高陡边坡变形与稳定性分析方法”(50539100)、“深部岩体的工程特性”(50639100),以及国家自然科学基金项目“高地应力区裂隙岩体 EDZ 的水—力强耦合机理及数值模拟方法”(50709026),对裂隙岩体变形破坏机理、渗流与应力耦合机理、岩体应力和变形的工程作用效应、复杂耦合系统的数值模拟等问题开展理论研究,并依托西南地区水电高陡边坡、大型地下工程开展渗流与变形的强耦合应用研究。从岩体渗流与应力双场耦合到多场广义耦合,从渗流与应力弱耦合到考虑工程作用效应的渗流与变形强耦合,研究工作经历了 15 年的历程。在这 15 年里,形成了一个从事耦合理论与应用研究的团队,培养了一批硕士和博士研究生,经过大家的努力,取得了如下一些研究进展:

(1) 考虑大型岩体的施工开挖、锚固支护等工程作用对岩体物理力学性质、应力和变形的影响,将这种工程作用也纳入耦合分析体系中,提出了

“多场广义耦合”的概念、研究路线和分析方法。

(2) 提出了考虑结构面弹性变形和塑性变形以及峰后力学特性的界面层模型；提出了考虑结构面渗流与变形耦合效应的广义立方定理、结构面饱和度与毛细压力的解析模型。

(3) 提出了基于流体扩散能叠加原理确定岩体渗透张量的新模型；提出了确定岩体表征单元体的能量叠加法 (ESM)、地质统计法 (GSM)；发展了岩体力学介质类型选择的“三准则”；从多场耦合的角度提出了岩体力学参数“5S 相关性”及参数场的概念和分析方法。

(4) 建立了不同自由度但形式统一的 $3+X$ 维多场耦合数值模拟的有限元格式；提出了岩体无压渗流分析的加密高斯点法以及采用排水子结构、Signorini 型变分不等式和自适应罚函数相结合的渗流模拟方法。

上述理论研究及工程应用成果，先后获得了电力工业科技进步二等奖 (1996)、教育部科技进步一等奖 (2005)，国家科技进步二等奖 (2006)，并于 2007 年获国家自然科学基金委员会杰出青年基金资助 (50725931)。这些研究成果正逐步应用于石油、矿山、核废料地质处置等其他领域。目前，复杂岩体多场广义耦合已成为“水资源与水电工程科学国家重点实验室”的一个重要研究方向。

笔者萌发撰写本专著的想法是在 2005 年，初稿完成于 2006 年。这几年有关岩体多场耦合的研究成果层出不穷，故在初稿基础上又作了补充完善，现定名为《复杂岩体多场广义耦合分析导论》。本书围绕岩体多场耦合机理与模型、耦合过程与模拟两个关键科学问题，立足岩体地质特征与赋存环境研究，注重岩体多场耦合工程作用效应研究，强调岩体多场耦合的模型选择与参数选取。在论述岩体多场耦合机理与数值模拟方面，既以介绍笔者及团队的研究成果为主，又力图兼顾国内外的研究现状和主要成果。

本书共分 10 章。第 1 章为绪论，介绍复杂岩体多场广义耦合的基本概念、研究思路、研究内容及研究方法等，力图描述复杂岩体多场广义耦合分析的总体架构；第 2 章为地质基础篇，论述岩体多场耦合研究涉及的岩体地质特征与赋存环境问题；第 3、第 4、第 5 和第 6 章为岩体多场广义耦合机理研究篇，涉及岩体变形和渗透特性、岩体介质模型与力学参数、岩体 THM 耦合及工程作用效应等若干问题；第 7、第 8、第 9 和第 10 章为岩体多场广义耦合数值模拟篇，从岩体应力场、渗流场及其耦合的数值模拟入手，重点阐述岩体 THM 多场耦合分析的数值模拟方法。

必须指出，笔者研究团队的全体成员为本书的编著倾注了大量心血，笔

者的一批博士研究生也为本书付出了辛勤劳动。瑞典皇家工学院的井兰如教授、法国里尔科技大学的邵建富教授等给予笔者许多鼓励和有益建议，对本书作出了重要贡献。笔者谨向上述各位及本书所引用的文献作者致谢。还要特别感谢国家自然科学基金委给予的资助，感谢中国长江三峡工程开发总公司、长江水利委员会长江勘测规划设计研究院、湖北清江水电开发有限责任公司、中国水电工程顾问集团公司、成都勘测设计研究院、中南勘测设计研究院、华东勘测设计研究院、昆明勘测设计研究院、西北勘测设计研究院和贵阳勘测设计研究院等单位在应用研究方面给予的支持。

周创兵

2008年11月10日于武昌

目 录

前言

第 1 章 绪论	1
1.1 研究对象	2
1.1.1 复杂岩体	2
1.1.2 多场耦合	3
1.1.3 工程作用	6
1.1.4 多场广义耦合	7
1.2 研究意义	8
1.2.1 岩石力学研究的热点	8
1.2.2 重大工程建设的需求	9
1.2.3 岩石力学发展的产物	11
1.3 研究现状	14
1.3.1 单裂隙渗流模型与耦合机理研究	14
1.3.2 岩体渗流模型与耦合机理研究	16
1.3.3 岩体渗流介质类型与参数研究	18
1.3.4 岩体多场耦合数值分析研究	19
1.3.5 核废料处置 THMC 耦合研究	20
1.4 研究内容与研究方法	22
1.4.1 研究内容	22
1.4.2 研究方法	24
主要参考文献	25
第 2 章 岩体地质特征与赋存环境研究	28
2.1 地质结构面	28
2.1.1 地质结构面的成因	28
2.1.2 地质结构面的分级	29

2.1.3 地质结构面的特征·····	30
2.2 岩体结构特征·····	37
2.2.1 地质结构·····	37
2.2.2 岩体结构特征·····	38
2.2.3 岩体质量分类·····	40
2.3 结构面的模型与模拟·····	43
2.3.1 结构面的物理模型·····	44
2.3.2 结构面的张量模型·····	45
2.3.3 结构面的分形结构·····	48
2.3.4 结构面网络的模拟·····	52
2.4 岩体赋存环境特征·····	56
2.4.1 地应力场·····	56
2.4.2 地下水渗流场·····	62
2.4.3 地温场·····	69
主要参考文献·····	73
第3章 岩体变形与渗透特性研究·····	75
3.1 岩块及结构面变形特性的一般性描述·····	75
3.1.1 岩块的变形特性·····	75
3.1.2 结构面的变形特性·····	78
3.2 结构面变形的 Plesha 模型·····	81
3.2.1 模型概化·····	81
3.2.2 本构关系·····	81
3.2.3 结构面的剪胀演化·····	83
3.3 结构面变形的界面层模型·····	84
3.3.1 界面层的弹性本构模型·····	85
3.3.2 界面层弹塑性本构模型·····	88
3.4 结构面的渗透特性·····	92
3.4.1 光滑平行板模型·····	92
3.4.2 立方定理的修正·····	93
3.5 结构面的非饱和渗透特性·····	96
3.5.1 结构面非饱和渗流机理·····	96
3.5.2 入侵概念模型与张开度分布·····	97
3.5.3 非饱和水力参数模型·····	100
3.6 岩体的渗透特性与渗透张量·····	102
3.6.1 岩体渗透介质类型·····	102
3.6.2 岩体渗透张量·····	104
主要参考文献·····	108

第4章 岩体表征单元体与力学参数研究	112
4.1 岩体表征单元体	112
4.1.1 表征单元体的概念	113
4.1.2 岩体的尺度及其与 REV 的关系	115
4.1.3 岩体力学模型的选取	116
4.1.4 岩体表征单元体的存在性	118
4.2 岩体表征单元体的确定方法	120
4.2.1 能量叠加法 (ESM)	121
4.2.2 地质统计法 (GSM)	123
4.2.3 数值试验法 (NSM)	124
4.3 岩体力学参数	127
4.3.1 岩体力学参数的含义与特征	127
4.3.2 岩体力学参数的尺寸效应	130
4.3.3 岩体力学参数的工程意义	134
4.4 岩体力学参数取值方法	136
4.4.1 基于岩体质量分类的参数取值方法	136
4.4.2 基于岩体 REV 的参数取值方法	138
4.4.3 岩体力学参数的反演分析	144
主要参考文献	150
第5章 岩体多场耦合机理研究	152
5.1 结构面渗流与变形耦合机理	152
5.1.1 法向荷载作用下结构面渗流与变形的耦合机理	152
5.1.2 压剪荷载作用下结构面渗流与变形的耦合机理	154
5.1.3 结构面渗流的广义立方定理	156
5.2 岩块渗流与变形耦合机理	162
5.2.1 岩块渗流与变形耦合基本规律	162
5.2.2 岩块渗流与变形耦合模型	163
5.3 岩体渗流与变形耦合机理	166
5.3.1 岩体渗流与变形耦合机理的研究方法	166
5.3.2 岩体渗流与应力耦合模型	167
5.3.3 应变敏感的岩体渗透张量模型	168
5.4 岩体温度—变形—渗流耦合机理	174
5.4.1 岩石温度与变形耦合机理	174
5.4.2 岩石温度与渗流耦合机理	176
5.4.3 岩体温度—变形—渗流耦合模型	178
主要参考文献	183

第6章 岩体工程作用效应研究	188
6.1 岩体开挖效应	188
6.1.1 岩体开挖松动区的定义及形成机理	189
6.1.2 岩体开挖的损伤区和破坏区	189
6.1.3 岩体爆破开挖过程的动态卸载松动机理	192
6.1.4 松动岩体的工程特性	194
6.2 岩体开挖爆破损伤	196
6.2.1 爆破开挖诱发的动力荷载	196
6.2.2 爆炸荷载作用下岩体的动力损伤	198
6.3 岩体的锚固效应	201
6.3.1 锚杆支护的锚固机理	201
6.3.2 岩体锚固系统及群锚效应	202
6.3.3 加锚岩体的力学特性	203
6.4 岩体灌浆加固效应	207
6.4.1 灌浆充填机理	208
6.4.2 灌浆流体运动规律	209
6.4.3 岩体灌浆效果	210
主要参考文献	213
第7章 岩体应力场有限单元法数值模拟研究	217
7.1 有限单元法分析基本原理	217
7.2 岩体地应力场数值模拟	219
7.2.1 初始地应力场的位移反分析方法	220
7.2.2 初始地应力场的回归反分析方法	230
7.2.3 基于多源信息的初始地应力场反分析方法	231
7.3 岩体施工开挖及锚固支护数值模拟	245
7.3.1 岩体施工开挖数值模拟	245
7.3.2 岩体锚固支护数值模拟	248
7.4 工程实例	251
7.4.1 工程概况	251
7.4.2 有限元模型与计算条件	252
7.4.3 边坡施工过程中的应力—变形分析	254
主要参考文献	259
第8章 岩体渗流场有限单元法数值模拟研究	261
8.1 渗流场有限元法分析原理	261
8.1.1 连续介质渗流控制微分方程	261
8.1.2 渗流方程定解条件	262

8.1.3	渗流场的有限元计算格式	262
8.1.4	渗流量的计算方法	263
8.2	无压渗流及渗控结构数值模拟	264
8.2.1	求解渗流自由面的加密高斯点法	265
8.2.2	有自由面渗流问题的变分不等式方法	267
8.2.3	排水孔幕数值模拟的 SVA 法	268
8.2.4	分析算例	272
8.3	岩体裂隙网络渗流分析	277
8.3.1	结构面网络几何分析	277
8.3.2	结构面网络渗流分析	280
8.3.3	网络渗流算例	282
8.4	降雨入渗非饱和渗流场数值模拟	284
8.4.1	数学模型	284
8.4.2	定解条件	285
8.4.3	有限元计算格式	286
8.4.4	降雨入渗工程算例	287
	主要参考文献	291

第9章 岩体应力场渗流场 DDA 数值模拟研究

9.1	DDA 方法分析原理	293
9.1.1	块体单元的位移模式	294
9.1.2	总体的平衡方程	294
9.1.3	接触界面的约束条件	295
9.2	岩体应力场 DDA 数值模拟	297
9.2.1	位移收敛准则	298
9.2.2	速度收敛准则	298
9.2.3	加速度收敛准则	298
9.2.4	算例与有效性检验	299
9.3	岩体施工开挖 DDA 数值模拟	303
9.3.1	岩体开挖的 DDA 计算方法	304
9.3.2	算例分析	306
9.4	岩体锚固支护 DDA 数值模拟	311
9.4.1	锚杆计算模型	312
9.4.2	锚杆单元的刚度矩阵	312
9.4.3	锚杆单元的预应力矩阵	313
9.4.4	算例分析	313
9.5	基于 DDA 的岩体渗流—应力耦合分析	315
9.5.1	裂隙网络的渗流分析	316

9.5.2	作用于裂隙的水压荷载矩阵	317
9.5.3	基于 DDA 的岩体水力耦合分析	319
9.5.4	基于 DDA 的岩体非饱和水力耦合分析	320
	主要参考文献	326
第 10 章	岩体多场广义耦合数值模拟研究	328
10.1	岩体多场耦合数学模型	328
10.1.1	基本假设	329
10.1.2	动量守恒方程	329
10.1.3	水体质量守恒方程	331
10.1.4	气体质量守恒方程	335
10.1.5	能量守恒方程	336
10.1.6	控制方程汇总	337
10.2	岩体多场广义耦合数值计算格式	339
10.2.1	问题描述	339
10.2.2	有限元计算格式	340
10.3	岩体 THM 耦合过程及数值模拟	343
10.3.1	若干 THM 耦合数学模型的比较	343
10.3.2	饱和岩体的 THM 耦合过程	348
10.3.3	HM 耦合过程	349
10.4	岩体 THM 耦合过程算例	350
10.4.1	HM 耦合过程中坝基岩体渗透特性的演化规律	350
10.4.2	深埋洞室开挖引起的 HM 耦合过程	352
10.4.3	锦屏二级水电站岩体的 HM 耦合及隧洞涌水预测	354
	主要参考文献	364
	后记	367

Contents

PREFACE

Chapter 1 Introduction	1
1.1 Research objectives	2
1.1.1 Complex rock masses	2
1.1.2 Multi – field couplings	3
1.1.3 Engineering disturbances	6
1.1.4 Generalized multi – field couplings	7
1.2 Research significances	8
1.2.1 A hot research topic in rock mechanics	8
1.2.2 A demand for huge engineering construction	9
1.2.3 A result of development in rock mechanics	11
1.3 Research status	14
1.3.1 Flow models and coupling mechanisms for single fractures	14
1.3.2 Flow models and coupling mechanisms for rock masses	16
1.3.3 Flow medium types and corresponding parameters for rock masses	18
1.3.4 Numerical analysis for multi – field couplings in rock masses	19
1.3.5 Coupled THMC processes in nuclear waste disposal	20
1.4 Content and methodology	22
1.4.1 Content	22
1.4.2 Methodology	24
Main references	25
Chapter 2 Geological characteristics and Geo – enviroenment of rock masses	28
2.1 Geological fractures	28
2.1.1 Formation of geological fractures	28
2.1.2 Classification of geological fractures	29

2.1.3	Characteristics of geological fractures	30
2.2	Characteristics of rock structures	37
2.2.1	Geological structures	37
2.2.2	Characteristics of rock mass structures	38
2.2.3	Rock mass quality classification	40
2.3	Geometrical models for fractures	43
2.3.1	Physical models for fractures	44
2.3.2	Tensorial models for fractures	45
2.3.3	Fractal structure of fractures	48
2.3.4	Simulation for fracture networks	52
2.4	Geological environment of rock masses	56
2.4.1	Geostress field	56
2.4.2	Seepage field	62
2.4.3	Thermal field	69
	Main references	73
Chapter 3	Deformation and fracture flow properties of rock masses	75
3.1	General description of rock and fracture deformation	75
3.1.1	Deformation behaviors of rock block	75
3.1.2	Deformation behaviors of fractures	78
3.2	Plesha's model for fracture deformation	81
3.2.1	Model description	81
3.2.2	Constitutive relationship	81
3.2.3	Evolution on fracture dilatancy	83
3.3	Interfacial layer model for fracture deformation	84
3.3.1	Elastic constitutive model for interfacial layers	85
3.3.2	Elasto – plastic constitutive model for interfacial layers	88
3.4	Flow properties of fractures	92
3.4.1	Smooth parallel plate model	92
3.4.2	Modifications of the cubic law	93
3.5	Unsaturated flow properties of fractures	96
3.5.1	Unsaturated flow mechanisms in fractures	96
3.5.2	Invasion concept model and distribution of aperture	97
3.5.3	Analytical model for unsaturated hydraulic parameters	100
3.6	Flow properties and permeability tensor for rock masses	102
3.6.1	Flow medium types for rock masses	102
3.6.2	Permeability tensor for rock masses	104
	Main references	108

Chapter 4	Representative elementary volume and mechanical parameters of rock masses	112
4.1	Representative elementary volume of rock masses	112
4.1.1	Concept of representative elementary volume	113
4.1.2	Scale of rock masses and its relationship with REV	115
4.1.3	Selection of mechanical models for rock masses	116
4.1.4	Existence of representative elementary volume of rock masses	118
4.2	Methods for estimating REV for rock masses	120
4.2.1	Energy superposition method (ESM)	121
4.2.2	Geological statistic method (GSM)	123
4.2.3	Numerical simulation method (NSM)	124
4.3	Mechanical parameters of rock masses	127
4.3.1	Implications and characteristics of rock mass mechanical parameters	127
4.3.2	Size effects of rock mass mechanical parameters	130
4.3.3	Engineering significance of rock mass mechanical parameters	134
4.4	Methods for estimation of rock mass mechanical parameters	136
4.4.1	Estimation method based on rock mass quality classification	136
4.4.2	Estimation method based on rock REV	138
4.4.3	Back analysis method on rock mass mechanical parameters	144
	Main references	150
Chapter 5	Multi – field coupling mechanisms in rock masses	152
5.1	Flow – deformation coupling mechanisms in fractures	152
5.1.1	Flow – deformation coupling mechanisms in fractures under normal loading	152
5.1.2	Flow – deformation coupling mechanisms in fractures under normal and shear loadings	154
5.1.3	A generalized cubic law for flow in fractures	156
5.2	Flow – deformation coupling mechanisms in rock blocks	162
5.2.1	Basic rules for flow – deformation coupling in rock blocks	162
5.2.2	Flow – deformation coupling models for rock blocks	163
5.3	Flow – deformation coupling mechanisms in rock masses	166
5.3.1	Methods for investigation of flow – deformation coupling mechanisms research in rock masses	166
5.3.2	A flow – stress coupled model for rock masses	167
5.3.3	A strain – dependent hydraulic conductivity tensor for rock masses	168
5.4	THM coupling mechanisms in rock masses	174

5.4.1	TM coupling mechanisms in rocks	174
5.4.2	TH coupling mechanisms in rocks	176
5.4.3	A THM coupling model for rock masses	178
	Main references	183
Chapter 6	Effects of engineering disturbances on rock masses	188
6.1	Excavation effects on rock masses	188
6.1.1	Definition of EDZ in rock masses and its formation mechanism	189
6.1.2	Excavation damage zone and failure zone in rock masses	189
6.1.3	Dynamic unloading release mechanisms in rock blasting excavation process	192
6.1.4	Engineering characteristics for loosened rock masses	194
6.2	Excavation blasting induced damage in rock masses	196
6.2.1	Dynamic loads induced by blasting excavation	196
6.2.2	Dynamic damage in rock masses subjected to blast loading	198
6.3	Anchoring effects on rock masses	201
6.3.1	Anchoring mechanisms for bolt supporting	201
6.3.2	Anchorage system and effects of anchor groups on rock masses	202
6.3.3	Mechanical characteristics of anchored rock masses	203
6.4	Reinforcement effects of grouting on rock masses	207
6.4.1	Filling mechanisms of grouting	208
6.4.2	Laws for grouting fluid movement	209
6.4.3	Effects of grouting on rock masses	210
	Main references	213
Chapter 7	FEM – based numerical simulation on stress fields in rock masses ...	217
7.1	Principle of finite element method for stress analysis	217
7.2	Numerical simulation on geostress fields in rock masses	219
7.2.1	Displacement back analysis method for initial geostress fields	220
7.2.2	Regression back analysis method for initial geostress fields	230
7.2.3	Multi – sources based back analysis method for initial geostress fields	231
7.3	Numerical simulation on excavation and anchoring in rock masses	245
7.3.1	Numerical simulation on excavation in rock masses	245
7.3.2	Numerical simulation on anchoring in rock masses	248
7.4	Case study	251
7.4.1	Brief introduction	251
7.4.2	Finite element model and computational conditions	252

7. 4. 3 Stress – deformation analysis for the slope construction	254
Main references	259

Chapter 8 FEM – based numerical simulation on seepage fields

in rock masses	261
8. 1 Principle of finite element method for seepage field analysis	261
8. 1. 1 Governing equations for seepage flow through continuous media	261
8. 1. 2 Initial and boundary conditions for seepage flow equations	262
8. 1. 3 Finite element formulation for seepage field analysis	262
8. 1. 4 Methods for computation of seepage flow	263
8. 2 Numerical simulation on unconfined seepage flow and seepage controlling structures	264
8. 2. 1 A gauss point densification method for locating seepage free surface ...	265
8. 2. 2 A variational inequality method for seepage problems with free surfaces	267
8. 2. 3 SAV method for numerical simulation on drainage holes	268
8. 2. 4 Numerical examples	272
8. 3 Discrete fracture flow analysis for rock masses	277
8. 3. 1 Geometric analysis of fracture networks	277
8. 3. 2 Discrete fracture flow analysis	280
8. 3. 3 A numerical example on fracture flow analysis for rock masses	282
8. 4 Numerical simulation on unsaturated seepage flow with rainfall infiltration	284
8. 4. 1 Mathematical model	284
8. 4. 2 Initial and boundary conditions	285
8. 4. 3 Finite element formulation	286
8. 4. 4 A numerical simulation on unsaturated seepage flow with ranfall infiltration	287
Main references	291

Chapter 9 DDA – based numerical simulation on stress and seepage

fields in rock masses	293
9. 1 Principle of DDA method	293
9. 1. 1 Displacement interpolation function for block elements	294
9. 1. 2 Balance equations	294
9. 1. 3 Constraints on contact surfaces	295
9. 2 DDA – based Numerical simulation on stress fields in rock masses	297
9. 2. 1 Displacement convergence criterion	298