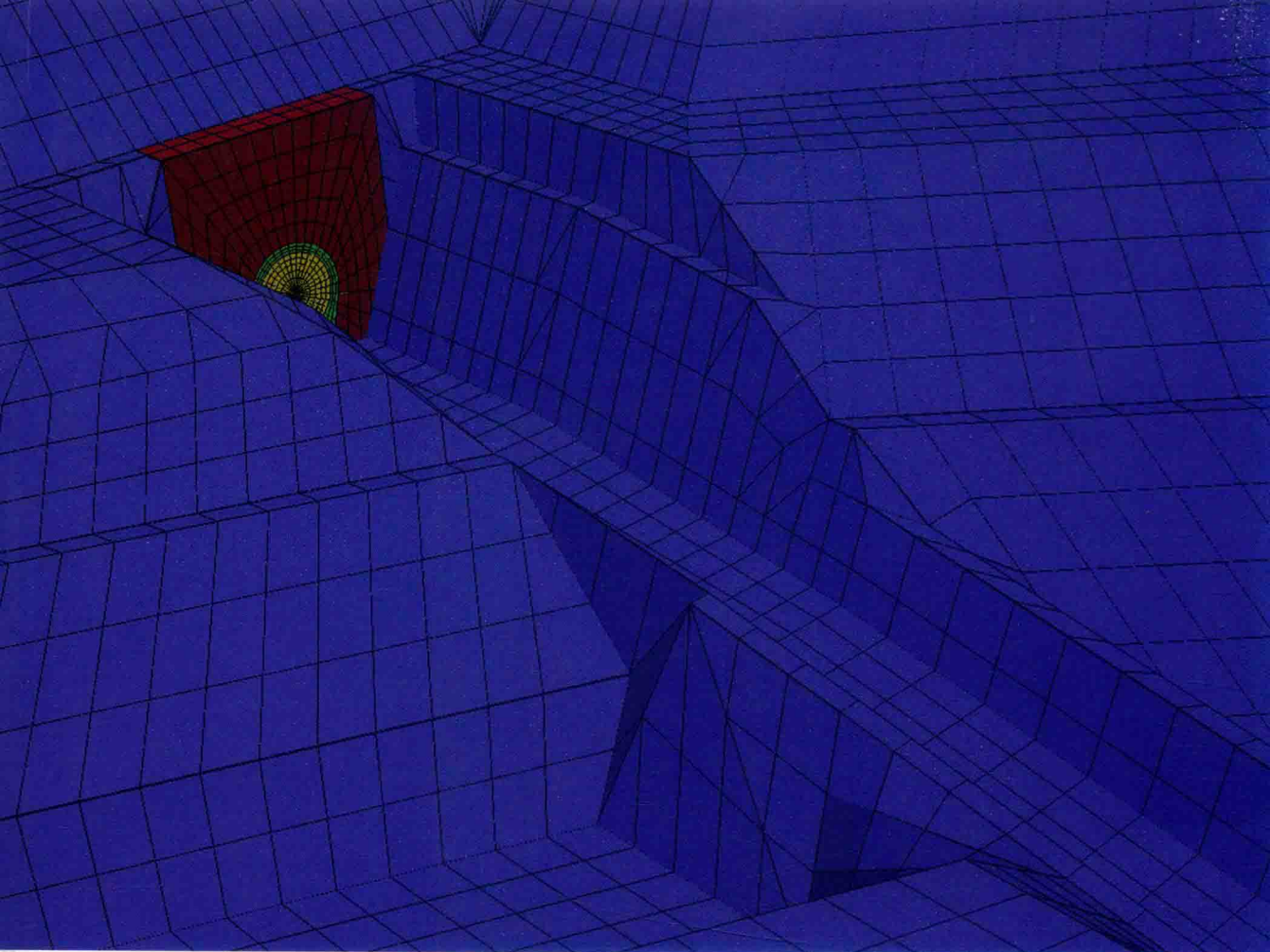




Itasca 岩土工程数值模拟方法及应用丛书

FLAC3D 数值模拟方法及工程应用

——深入剖析 FLAC3D 5.0（第二版）

王涛 韩煊 苏凯 朱永生 编著

中国建筑工业出版社

Itasca 岩土工程数值模拟方法及应用丛书

FLAC3D 数值模拟方法及工程应用 ——深入剖析 FLAC3D 5.0

(第二版)

王涛 韩焯 苏凯 朱永生 编著



中国建筑工业出版社

图书在版编目 (CIP) 数据

FLAC3D 数值模拟方法及工程应用: 深入剖析 FLAC3D 5.0/
王涛等编著. —2 版. —北京: 中国建筑工业出版社, 2019. 9

(Itasca 岩土工程数值模拟方法及应用丛书)

ISBN 978-7-112-24000-5

I. ①F… II. ①王… III. ①土木工程-数值计算-应用软件

IV. ①TU17

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2019) 第 149258 号

本书系统全面地介绍了 FLAC3D 5.0 数值分析软件的功能、操作方法及开发技术, 并结合了大量相关工程, 既满足初学者的要求, 也为有一定基础的读者深入学习 FLAC3D 提供了理论参考和应用实例。全书共 14 章, 主要内容包括: FLAC3D 数值方法介绍; FLAC3D 5.0 新功能及快速入门; 网格的生成; FLAC3D 中内置语言——FISH 语言; FLAC3D 中的本构模型及二次开发; FLAC3D 中的流固耦合分析; FLAC3D 中的流变分析; FLAC3D 中的动力分析; FLAC3D 中的结构单元; FLAC3D 在边坡中的应用; FLAC3D 在地铁工程中的应用; FLAC3D 在基坑工程中的应用; FLAC3D 在矿山工程中的应用; FLAC3D 在地下厂房围岩稳定分析中的应用。

本书可供土木、矿山、地质、水利水电、石油、交通等专业从事岩土力学数值模拟、工程设计与研究的工程师和在校师生参考使用, 也可作为相关专业的本科生和研究生教材。

责任编辑: 辛海丽

责任校对: 张 颖

Itasca 岩土工程数值模拟方法及应用丛书

FLAC3D 数值模拟方法及工程应用——深入剖析 FLAC3D 5.0

(第二版)

王涛 韩焯 苏凯 朱永生 编著

*

中国建筑工业出版社出版、发行 (北京海淀三里河路 9 号)

各地新华书店、建筑书店经销

北京红光制版公司制版

北京建筑工业印刷厂印刷

*

开本: 787×1092 毫米 1/16 印张: 40 字数: 997 千字

2019 年 10 月第二版 2019 年 10 月第五次印刷

定价: 108.00 元

ISBN 978-7-112-24000-5

(34291)

版权所有 翻印必究

如有印装质量问题, 可寄本社退换

(邮政编码 100037)

序 言

当我们听到这本关于 FLAC3D 理论基础与工程应用的专著即将出版第二版的消息以后,全体国际 Itasca 咨询集团的人员非常开心。FLAC3D 作为解决复杂岩土力学问题的一项重要基础工具,我们非常高兴地看到其在中国的应用越来越广泛。毫无疑问,这本书对越来越多的 FLAC3D 使用者将产生深远的影响。

在新版本中,王涛教授及其合著者增加了一些有趣的新算例和工程应用,包括初始应力模拟,渗流场的模拟,结构单元的模拟,边坡稳定计算的强度折减方法等。实际上,位于杭州的浙江中科 Itasca 岩石工程研发有限公司(2012 年 Itasca 国际集团与中国电建集团华东勘测设计研究院有限公司、中国科学院武汉岩土力学研究所合作在华设立的分支机构)目前正在研究两个世界级规模的工程项目:中国锦屏地下实验室和白鹤滩水电站工程。中国的研究人员和工程师还在许多不同领域的科研与工程项目中使用了 FLAC3D,包括采矿工程(第 13 章),地铁工程(第 11 章),深基坑工程(第 12 章),地下厂房洞室工程(第 14 章)和尾矿库工程(第 13 章)等。我们为 FLAC3D 在这些工程中作出的贡献感到由衷的自豪,并且对经常出现新的应用领域和使用此软件完成的高水平工作印象非常深刻。

本书将会继续帮助初学者学习该软件,我们希望 FLAC3D 在中国的影响力能越来越大。同时,我们研发人员也一直在努力改善 FLAC3D 的功能,适用性和计算性能。随着 FLAC3D 不断发展,我们期待着将来有更多的著作来描述该软件新的以及更强大的功能,以满足科研人员和工程师提出的新需求。

Jim Hazzard 简介:

1994 年本科毕业于加拿大 Queen's University,1998 年博士毕业于英国 Keele University,导师为:Prof. Paul Young(加拿大皇家科学院院士,多伦多大学副校长),1999~2002 年于英国 University of Liverpool 任研究助理,2002~2004 年于加拿大 University of Toronto 任助理研究员,2004~2010 年在 Rocscience 公司从事岩土软件开发工作,2010~2014 任 Itasca Consulting Group 高级工程师,2014 年至今任 Itasca Consulting Group 主任工程师,软件开发部负责人。

Preface

We at Itasca are very excited about the new edition of this important book on the fundamentals and applications of FLAC3D. We are pleased to see the increasing adoption of FLAC3D as a tool for solving complex geomechanical problems in China and it is likely that this book has contributed to this rise in popularity.

In this book, Prof. Wang and co-authors add some new interesting case studies including initial stress simulation, seepage simulation, structural elements, strength reduction method for slope stability, etc. The HydroChina-Itasca R&D Center in Hangzhou is currently working on two world class projects: the Jinping Underground Research Laboratory (URL) and the Baihetan Hydropower Plant. Other researchers and engineers in China have also used FLAC3D in many different projects including simulation of mining excavations (Chapter 13), subways (Chapter 11), foundation trench engineering (Chapter 12), analysis of powerhouse caverns (Chapter 14) and tailings ponds (Chapter 13). We are proud of the contributions that FLAC3D has made to these endeavors and are often impressed with the range of applications and the quality of the work that can be achieved using this software.

This book continues to help new users become familiar with the software and we hope that its use in China will continue to grow. We are continually trying to improve the functionality, usability and performance of FLAC3D and we look forward to many more editions in the future describing new and exciting features as FLAC3D continues to evolve to meet the needs of practicing engineers.



Jim Hazzard

Software Manager
Itasca Consulting Group
Minneapolis, Minnesota, USA

第 二 版 前 言

2015 年 8 月, 本书的第一版正式出版。那段时间工作和生活方面事情很多, 时间和精力有限, 因此出版以后, 我是以忐忑的心情等待读者的反馈。出版至今, 本书第一版经历了 4 次印刷, 销售总量达到 5500 册以上。我收到了大量读者的邮件, 读者的热情, 激励了我进一步完善本书的念头。一方面反映了 FLAC3D 目前在国内应用越来越广泛, 另一方面, 也说明了我们的工作得到了读者的广泛认可。2018 年 6 月, 在美国西雅图参加第 52 届美国岩石力学大会 (ARMA) 期间, 我访问了位于 Minneapolis 的 Itasca 公司美国总部, 并与 Charles E. Fairhurst 博士 (CEO) 进行了深入的交流, Fairhurst 博士对于我们出版 FLAC3D 中文教材的事宜非常支持, 并委托软件开发部主任 Jim Hazzard 博士为本书第二版写了序言。

近些年, 我们采用 FLAC3D 开展了地下厂房工程、隧道工程和尾矿库工程等方面的应用研究, 同时也将该书作为本科生毕业设计和硕士研究生毕业论文的参考教材使用。经过 4 年的积累和检验, 有了一些新的体会和经验, 我们也愿意与读者分享。因此, 在第二版中, 除了更正第一版中出现的错误外, 主要有以下变化:

- 第 2 章中, 增加了初始地应力计算部分;
- 第 3 章中, 增加了借助第三方软件建模部分;
- 第 6 章中, 增加了自由水面稳定流计算部分, 厄瓜多尔 CCS 工程高压引水隧洞渗流场计算;
- 第 13 章中, 增加了尾矿库动力计算 (FLAC3D 6.0) 部分;
- 增加了第 9 章, FLAC3D 中的结构单元;
- 增加了第 14 章, FLAC3D 在地下厂房围岩稳定分析中的应用;
- 删掉了原第 12 章, FLAC3D 在文物保护工程中的应用。

在第二版中, 章节安排是这样的: 全书共 14 章, 其中 1~5 章为基础知识部分, 6~9 章为专题模块部分, 10~14 章为工程应用部分。全书的编写分工如下: 全书的章节安排和统稿由武汉大学王涛负责; 第 1 章由王涛执笔; 第 2 章由赵先宇、王涛和褚存执笔; 第 3 章由赵先宇、徐大朋 (湖北省水利水电规划勘测设计院)、王涛和漆鹏 (中国电建集团成都勘测设计研究院有限公司) 执笔; 第 4 章由周丽娜、王涛和袁平 (中冶长天国际工程有限责任公司) 执笔; 第 5 章由肖雄 (中蓝长化工程科技有限公司) 和赵先宇执笔; 第 6 章由杜婷婷、刘骞和王涛执笔; 第 7 章由朱永生执笔; 第 8 章由周炜波 (中国电建西北勘测设计研究院有限公司) 执笔; 第 9 章由伍鹤皋、曹正钢、苏凯和程龙 (长江勘测规划设计研究有限责任公司) 执笔; 第 10 章由周炜波、周勇 (浙江中科 Itasca 岩石工程研发有限公司) 和王涛执笔; 第 11、12 章由韩煊 (北京市勘察设计研究院有限公司) 执笔; 第 13 章由王涛、何远、朱远乐 (长沙矿山研究院有限公司)、胡万瑞 (澳大利亚莫纳什大学)、曾俊 (湖北省水利水电规划勘测设计院)、肖俊 (湖北省水利水电科学研究院) 执

笔；第 14 章由苏凯、张妍珺、伍鹤皋和朱永生（浙江中科 Itasca 岩石工程研发有限公司）执笔。参加本书编写的还有武汉大学邓宇轩、张浩浩和中国地质大学（武汉）王穗丰。

作者非常感谢国家自然科学基金海外及港澳学者合作项目（编号：51428902）、国家自然科学基金面上项目（编号：51579194 & 51879207）、国家自然科学基金面上项目（编号：51679175）、水资源与水电工程科学国家重点实验室水工结构所科研业务费的资助。非常感谢美国沙特阿美（Aramco Service Company）休斯敦研究中心韩彦辉博士（原 Itasca 公司美国总部 FLAC 系统主管）、浙江中科 Itasca 岩石工程研发有限公司总经理褚卫江教授、军事科学院工程防护研究所徐景茂博士、Itasca 公司美国总部 FLAC3D 软件开发、培训和技术支持负责人程昭博士、长沙矿山研究院有限公司李向东教授、中钢集团武汉安全环保研究院有限公司汪晓霖教授、中煤科工集团重庆研究院有限公司陈金华研究员在本书完成过程中给予的鼓励和帮助。

这里需要说明，FLAC3D 自带手册是学习该软件的基础，同时可以称为岩土工程与科学研究的一部宝典，本书则是在此基础上编撰完成。由于作者水平有限，这一版本仍然会出现欠妥或不当的地方，敬请读者在使用过程中批评指正。

如果读者需要本书中涉及的命令流及源代码，可以与我联系：htwang@whu.edu.cn。



2019 年 8 月于珞珈山

第一版前言

FLAC3D 是由 Itasca 国际集团公司 (Itasca International Inc.) 开发的岩土工程专业数值分析软件。程序算法的起源可以追溯到 20 世纪 60 年代,距今已经有近 60 年历史。FLAC3D 核心开发者为离散元之父 Peter Cundall 博士,目前是美国工程院院士和英国工程院院士。在世界范围内,FLAC/FLAC3D 已经成为岩土工程及相关行业数值模拟的主流产品,在边坡、基坑、隧道、地下洞室、采矿、能源及核废料存储等领域得到广泛的应用。软件可以计算岩土体在各种外荷载作用下产生的变形、应力、稳定性,尤其擅长计算岩土体破坏后的大变形和峰后特性等问题。同时,在非线性动力计算、本构模型二次开发和多场耦合等方面,软件也提供了专业的解决方案。20 世纪 90 年代,我国部分高校和科研院所开始引进该软件,目前该软件已经逐渐成为岩土工程界影响最为深远的专业软件之一。

作者曾经于 2004 年赴美国和加拿大 Itasca 咨询公司工作访问,对该软件产生了浓厚的兴趣,后来又在国内长期从事与该软件相关的研究与教学工作,并一直与 Itasca 核心研发人员 Peter Cundall、Roger Hart、Christine Detournay 和韩彦辉等保持技术交流。目前该软件已经升级到 5.0,最新版本号是 5.01.131。本书主要以最新版的 FLAC3D 5.0 为介绍对象。从 3.1 到 5.0,软件的界面已经发生了彻底的变化,各种计算功能也在增强,但目前国内还没有专门的参考书籍。在中国建筑业出版社辛海丽博士的建议下,我们着手准备了这本参考书,目的是为岩土工程及相关专业的数值模拟爱好者提供新的参考素材。

本书力争理论联系实际,既满足初学者的要求,也可以为有一定基础的读者深入学习 FLAC3D 提供理论背景和应用实例,本书可供土木、矿山、地质、水利水电、石油、交通等专业从事岩土力学数值模拟、工程设计与研究的工程师和在校师生参考使用,也可作为相关专业的本科生和研究生教材。

全书共 13 章,其中 1~5 章为基础知识部分,6~8 章为专题模块,9~13 章为应用实例部分。全书的编写分工如下:全书的章节安排和统稿由武汉大学王涛负责,第 1 章由王涛执笔;第 2 章由赵先宇、王涛执笔;第 3 章由赵先宇、徐大朋执笔;第 4 章由周丽娜、王涛执笔;第 5 章由肖雄(化工部长沙设计研究院有限公司)、赵先宇执笔;第 6 章由杜婷婷执笔;第 7 章由朱永生(Itasca(武汉)咨询有限公司)执笔;第 8 章由周炜波执笔;第 9 章由周炜波、王涛执笔;第 10、11、12 章由韩煊(北京市勘察设计研究院有限公司)执笔;第 13 章由王涛、朱远乐(长沙矿山研究院有限公司)、胡万瑞、曾俊和肖俊执笔。参加本书编写的还有武汉大学程龙、漆鹏、郑汉种和周勇(浙江中科 Itasca 岩石工程研发有限公司)以及北京市勘察设计研究院有限公司的侯伟、尹宏磊、罗文林和王鑫等。

作者非常感谢国家自然科学基金海外及港澳学者合作项目(编号:51428902);国家自然科学基金面上项目(编号:51304237);煤炭资源与安全开采国家重点实验室开放课题(编号:SKLCRSM14KFB06);湖北省和武汉大学教学改革研究项目(JG2013036);

水资源与水电工程科学国家重点实验室水工结构所科研业务费的资助。非常感谢美国沙特阿美 (Aramco Service Company) 休斯敦研究中心韩彦辉博士 (原 FLAC 系统主管)、长沙矿山研究院有限公司李向东教授、中钢集团武汉安全环保研究院有限公司汪晓霖教授、中煤科工集团重庆研究院有限公司陈金华副研究员在本书完成过程中给予的鼓励和帮助。

由于时间仓促, 作者水平有限, 难免会有一些纰漏和错误, 敬请广大读者批评指正, 联系邮件: htwang@whu.edu.cn。

王涛

2015 年 8 月于珞珈山

目 录

第 1 章	FLAC3D 数值方法介绍	1
1.1	FLAC/FLAC3D 简介	1
1.1.1	FLAC/FLAC3D 研发历史	1
1.1.2	ITASCA 公司简介	1
1.2	FLAC/FLAC3D 计算的数学力学原理	2
1.2.1	显式有限差分方法的一般原理	2
1.2.2	显式/动态求解方法	4
1.2.3	空间导数的有限差分近似	5
1.2.4	本构关系	5
1.2.5	时间导数的有限差分近似	6
1.2.6	阻尼力	6
1.2.7	三维问题有限差分数值原理与方法	7
1.3	拉格朗日快速差分方法与有限元方法的比较	8
1.4	FLAC 与通用有限元软件的比较	9
第 2 章	FLAC3D 5.0 新功能及快速入门	11
2.1	FLAC3D 5.0 新功能概述	11
2.1.1	FLAC3D 5.0 简介	11
2.1.2	FLAC3D 5.0 新功能	11
2.2	FLAC3D 5.0 界面介绍	16
2.2.1	窗格	17
2.2.2	菜单栏	22
2.2.3	工具栏	36
2.2.4	标题栏	37
2.2.5	状态栏	37
2.3	FLAC3D 5.0 基本操作	37
2.3.1	项目文件	37
2.3.2	命令执行	40
2.3.3	状态追踪	40
2.3.4	信息查看	42
2.3.5	数据文件	43
2.3.6	绘图输出	44

2.3.7 快捷命令	54
2.4 FLAC3D 5.0 快速入门	56
2.4.1 FLAC3D 5.0 基本概念	56
2.4.2 FLAC3D 5.0 基本命令	62
2.5 初始地应力场的计算	71
2.5.1 不考虑重力影响的均匀应力	72
2.5.2 考虑应力梯度的均匀材料	72
2.5.3 考虑应力梯度的非均匀材料	74
2.5.4 非均匀网格的应力初始化	74
2.5.5 非均匀网格的压实	77
2.5.6 模型改变后的初始应力	79
2.5.7 带有浸润面的应力和孔隙压力的初始化	80
2.5.8 速度的初始化	82
2.5.9 初始地应力算例	82
2.6 基坑开挖算例	86
2.6.1 问题描述	86
2.6.2 模型建立	86
2.6.3 本构及材料	89
2.6.4 初始、边界条件	89
2.6.5 监测求解	90
2.6.6 结果解释	91
2.6.7 开挖求解	93
2.6.8 结构支撑	95
第3章 网格的生成	98
3.1 网格生成基本方法	98
3.1.1 网格生成器的概述	98
3.1.2 调整网格为简单形状	105
3.1.3 网格密化	108
3.1.4 用 FISH 语言生成网格	113
3.2 网格拉伸工具	115
3.2.1 基本和核心概念	115
3.2.2 创建视图中的操作	125
3.2.3 拉伸视图中的操作	132
3.2.4 补充信息	135
3.3 使用几何数据	142
3.3.1 几何数据	142
3.3.2 可视化	143
3.3.3 指定组	145

3.3.4 几何范围	146
3.3.5 加大离散化或致密化单元体	147
3.3.6 用 FLAC3D 命令实现 SpaceRanger 功能——解决模型问题	149
3.3.7 表面地形和分层	157
3.4 借助第三方软件建立模型的方法	163
3.4.1 FLAC3D 5.0 与 GOCAD 模型的连接方法	163
3.4.2 FLAC3D 6.0 与第三方软件模型的连接方法	165
第 4 章 FLAC3D 中内置语言——FISH 语言	168
4.1 FISH 语言简介	168
4.2 代码的编写规范	169
4.2.1 命名规则与代码书写	169
4.2.2 查错方法	170
4.3 变量与函数	170
4.3.1 变量与函数名	170
4.3.2 函数的创建	171
4.3.3 函数的调用	171
4.3.4 函数的删除和重定义	172
4.3.5 变量与函数的区别及适用范围	172
4.4 数据类型	173
4.4.1 基本类型	173
4.4.2 运算符和类型转换	175
4.4.3 字符串	175
4.4.4 指针	177
4.4.5 向量	177
4.5 控制语句	178
4.5.1 选择语句	178
4.5.2 条件语句	178
4.5.3 循环语句	179
4.5.4 其他结构控制语句	180
4.6 FISH 与 FLAC3D 的联系	181
4.6.1 被 FLAC3D 修改	181
4.6.2 FISH 函数的执行	182
4.6.3 执行 FISH 中的命令	183
4.6.4 错误处理	184
4.6.5 FISH 调用	185
4.7 应用实例	187

第 5 章	FLAC3D 中的本构模型及二次开发	189
5.1	理论介绍及使用指南	189
5.1.1	概述	189
5.1.2	FLAC/FLAC3D 中的本构模型	190
5.1.3	空模型组	191
5.1.4	弹性模型组	191
5.1.5	塑性模型组	194
5.2	开发自定义本构	198
5.2.1	简介	198
5.2.2	方法	199
5.2.3	执行	203
5.3	开发实例——以 Burgers 为例	209
5.3.1	准备工作	210
5.3.2	头文件 (.h)	212
5.3.3	源文件 (.cpp)	213
5.3.4	生成 .dll 文件	220
5.3.5	验证	220
第 6 章	FLAC3D 中的流固耦合分析	224
6.1	概述	224
6.2	流固耦合计算模式	225
6.2.1	无渗流模式	225
6.2.2	渗流模式	225
6.3	流体分析的参数和单位	227
6.3.1	渗透系数	227
6.3.2	密度	228
6.3.3	流体模量	229
6.3.4	孔隙率	230
6.3.5	饱和度	231
6.3.6	不排水热系数	231
6.3.7	流体抗拉强度	231
6.4	流体边界条件, 初始条件, 源与汇	231
6.5	单渗流问题和耦合渗流问题的求解	232
6.5.1	时标	233
6.5.2	完全耦合分析方法的选择	234
6.5.3	固定孔压 (有效应力分析)	236
6.5.4	单渗流分析建立孔压分布	237
6.5.5	无渗流——力学引起的孔压	237

6.5.6 流固耦合分析	239
6.6 承压水非稳定流算例	248
6.7 具有自由表面的稳定渗流算例	255
6.8 不同阶段高压引水隧洞渗流场分析	265
6.8.1 地质背景	265
6.8.2 计算模型	266
6.8.3 各种工况的渗流场	267
6.8.4 结论	272
第7章 FLAC3D 中的流变分析	273
7.1 概述	273
7.2 FLAC3D 中的蠕变模型	275
7.2.1 概述	275
7.2.2 MAXWELL 黏弹性模型 (Model Mechanical VISCOUS)	277
7.2.3 BURGERS 黏弹性模型 (Model Mechanical BURGERS)	279
7.2.4 BURGERS 黏弹塑性模型 (Model Mechanical CVISC)	281
7.2.5 二元 POWER-LAW 黏弹性模型 (Model Mechanical POWER)	284
7.2.6 POWER-LAW 律黏弹塑性模型 (Model Mechanical CPOWER)	286
7.2.7 参考蠕变律 WIPP 黏弹性模型 (Model Mechanical WIPP)	287
7.2.8 WIPP 黏弹塑性模型 (Model Mechanical PWIPP)	289
7.3 FLAC3D 蠕变分析关键概念及命令浅析	291
7.3.1 时间步长	291
7.3.2 时间步长的自动调整	293
7.3.3 温度相关性蠕变行为	294
7.3.4 蠕变分析流程及关键命令浅析	294
7.4 应用案例	295
7.4.1 概述	295
7.4.2 基本地质条件	297
7.4.3 施工期稳定性评价	299
7.4.4 运行期稳定性评价	301
7.4.5 数据文件	303
第8章 FLAC3D 中的动力分析	312
8.1 概述	312
8.2 与等效线性方法的相关性	312
8.2.1 等效线性方法的特点	312
8.2.2 完全非线性方法的特点	313
8.2.3 完全非线性方法在动力分析上的应用	314
8.3 动力方程	314

8.3.1 动态时步	314
8.3.2 动态多步	315
8.4 动力分析建模需注意的问题	319
8.4.1 动力荷载及边界条件	319
8.4.2 波的传播	341
8.4.3 力学阻尼与材料响应	341
8.4.4 动态孔隙水压力的生成及土体液化	349
8.5 动力问题的求解	351
8.5.1 动力力学计算模拟步骤	351
8.5.2 考虑水力耦合作用的动力计算	361
第 9 章 FLAC3D 中的结构单元	369
9.1 概述	369
9.1.1 相关术语	369
9.1.2 结构单元建模	370
9.1.3 边界条件与初始条件	375
9.1.4 局部坐标系与符号约定	375
9.2 结构单元	376
9.2.1 结构单元节点	376
9.2.2 线型结构单元	376
9.2.3 壳型结构单元	395
9.2.4 结构单元的连接	416
9.3 地下厂房岩壁吊车梁结构稳定计算分析	417
9.3.1 工程概况	417
9.3.2 计算模型与计算参数	418
9.3.3 施工期吊车梁锚杆支护和围岩联合工作受力特性	422
9.3.4 结论	437
第 10 章 FLAC3D 在边坡中的应用	438
10.1 强度折减法	438
10.1.1 边坡安全系数	438
10.1.2 强度折减法的基本原理	438
10.1.3 FLAC3D 中的强度折减法	439
10.1.4 边坡失稳的判据	441
10.2 FLAC3D 求解边坡安全系数的方法	441
10.2.1 具体边坡描述	441
10.2.2 计算结果分析	443
10.3 羊曲水电站泄洪洞出口边坡稳定性分析	445
10.3.1 工程概况及地质条件	446

10.3.2 天然边坡及开挖施工条件下的稳定性计算分析	446
10.3.3 泄洪洞内水外渗对边坡的稳定性影响	459
10.3.4 结论	464
第 11 章 FLAC3D 在地铁工程中的应用	466
11.1 概述	466
11.2 地铁隧道施工引起地层位移的基本规律	468
11.2.1 隧道施工引起的地表沉降规律	468
11.2.2 不同深度地层位移规律研究	471
11.3 隧道掘进的数值模拟的一般实现方法	473
11.4 FLAC3D 在地铁盾构工程中的应用	474
11.4.1 体积损失控制法的原理	474
11.4.2 应力释放	475
11.4.3 隧道沿线地层损失率插值	476
11.4.4 隧道沿线不同地层损失率的数值模拟实现	476
11.4.5 应力释放程序	476
11.4.6 典型工程模拟分析	477
11.4.7 小结	482
11.5 FLAC3D 在地铁矿山法中的应用	483
11.6 FLAC3D 在基坑施工对既有地铁车站影响中的应用	486
第 12 章 FLAC3D 在基坑工程中的应用	490
12.1 概述	490
12.2 基坑工程引起地层位移的基本规律	493
12.3 基坑工程支护结构的模拟方法	495
12.3.1 土钉与锚杆的模拟	495
12.3.2 地下连续墙与支护桩的模拟	496
12.3.3 内支撑的模拟	497
12.4 基坑工程中本构模型的选择	497
12.4.1 本构模型简介	497
12.4.2 模型参数	498
12.4.3 两种典型的应力路径下土体的变形特性的模拟	501
12.5 工程案例一：钻孔灌注桩+锚杆支护体系	502
12.5.1 工程概况	502
12.5.2 计算模型和地层参数	502
12.5.3 计算结果对比分析	505
12.5.4 小结	510
12.6 工程案例二：钻孔灌注桩+锚杆+内支撑支护体系	511
12.6.1 工程概况	511

12.6.2	计算模型的建立	511
12.6.3	基坑施工引起邻近既有建筑物的变形分析	514
第 13 章 FLAC3D 在矿山工程中的应用		515
13.1	概述	515
13.2	FLAC3D 解决的矿山问题	515
13.3	磷矿开采模拟方法	516
13.3.1	我国磷矿的主要开采技术	517
13.3.2	湖北钟祥熊家湾磷矿层开采计算	517
13.4	煤层开采模拟方法	529
13.4.1	煤层开采方法	529
13.4.2	山西晋城成庄煤矿煤层开采数值模拟	530
13.5	充填采矿模拟方法	543
13.5.1	矿山充填体的作用机理	544
13.5.2	FLAC3D 模拟充填采矿的方法	544
13.5.3	模拟计算的难点	546
13.5.4	金川二矿区充填采矿模拟	548
13.6	尾矿库工程	562
13.6.1	工程概况	562
13.6.2	计算模型与参数的选取	562
13.6.3	静力计算结果及分析	564
13.6.4	动力计算条件的设定	572
13.6.5	动力计算结果与分析	574
13.6.6	结论	579
第 14 章 FLAC3D 在地下厂房围岩稳定分析中的应用		580
14.1	概述	580
14.2	地下洞室算例	580
14.2.1	基本条件	580
14.2.2	模拟计算结果	582
14.2.3	数据文件	584
14.3	水电站地下厂房厂区概况	584
14.3.1	厂区基本地质条件	584
14.3.2	厂区岩体力学参数	586
14.4	标准段计算模型规划	588
14.5	主厂房与主变洞的间距研究	589
14.5.1	计算方案	589
14.5.2	计算结果分析	590
14.6	地下厂房分期开挖方案研究	598