

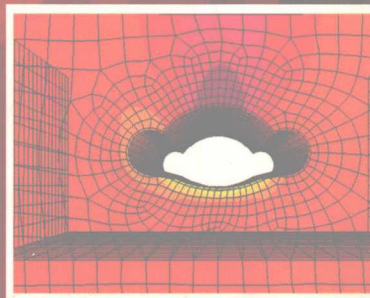
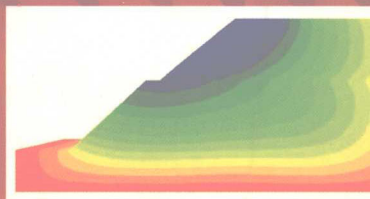
FLAC



随书赠送光盘

原理、实例与应用指南

©刘波 韩彦辉（美国） 编著



*FLAC Yuanli Shili yu
Yingyong Zhinan*



人民交通出版社

China Communications Press

国家自然科学基金(50304012)资助

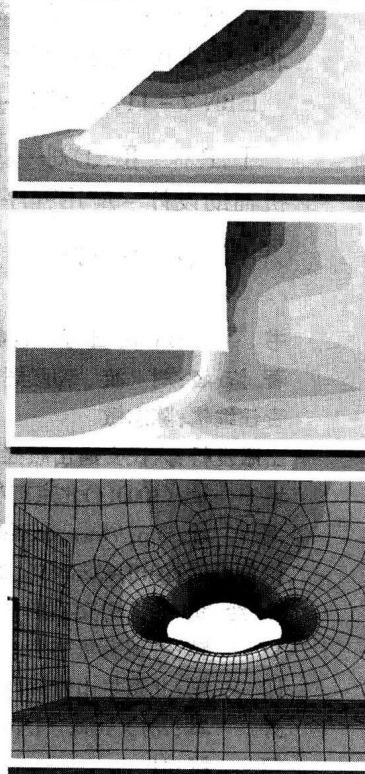
FLAC

原理、实例与应用指南

◎刘波 韩彦辉(美国) 编著

*FLAC Yuanli Shili yu
Yingyong Zhinan*

人民交通出版社



内 容 提 要

FLAC 及 FLAC3D 业已成为我国岩土力学与工程界发展最快、最具影响的数值分析软件系统,本书是国内第一本系统地论述 FLAC 及 FLAC3D 原理、实例与应用指南的著作。

全书分为理论篇、实例篇和应用指南篇。理论篇包括:FLAC 基本原理,岩土材料模型、结构模型及数值实现,流-固耦合分析,FISH 语言,FLAC 高级模块等内容;实例篇详细介绍了 FLAC 及 FLAC3D 在岩土力学、地基基础、边坡稳定、地铁隧道、水利工程、地质钻孔、堤坝地震分析等领域的十三个应用实例,其中包括作者主持的国家自然科学基金研究成果及在地铁工程中 FLAC3D 二次开发多个应用实例;应用指南篇分别介绍了 FLAC 及 FLAC3D 的建模原则、方法、应用技巧,求解过程与步骤,FISH 应用指南及技巧等。

随书所附光盘提供了学习 FLAC 及 FLAC3D 的程序系统、实例与指南,方便读者学习参考。

本书理论联系实际,内容系统全面,既满足初学者的要求,也为读者深入研习 FLAC 提供了详尽的理论背景与实例,可供土建、交通、采矿、地质、水利、环境、石油、工程力学等专业从事岩土工程数值计算、工程设计与研究的工程师和在校师生使用,也可作为教材或研究生教学参考书。

图书在版编目(CIP)数据

FLAC 原理、实例与应用指南/刘波,韩彦辉(美国)编著.

北京:人民交通出版社,2005.9

ISBN 7-114-05738-5

I. F… II. ①刘…②韩… III. 土木工程-计算机辅助设计-应用程序, FLAC IV. TU318-39

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2005)第 100101 号

书 名:FLAC 原理、实例与应用指南

著 作 者:刘 波 韩彦辉(美国)

责任编辑:陈志敏

出版发行:人民交通出版社

地 址:(100011)北京市朝阳区安定门外外馆斜街 3 号

网 址:<http://www.ccpress.com.cn>

销售电话:(010)85285656,85285838,85285995

总 经 销:北京中交盛世书刊有限公司

经 销:各地新华书店

印 刷:北京牛山世兴印刷厂

开 本:787×1092 1/16

印 张:41

字 数:1040 千

版 次:2005 年 9 月第 1 版

印 次:2005 年 9 月第 1 次印刷

书 号:ISBN 7-114-05738-5

印 数:0001~3000

定 价:80.00 元

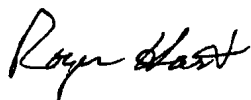
(如有印刷、装订质量问题,由本社负责调换)

Preface

FLAC and FLAC3D are two-and three-dimensional finite-difference/finite-volume computer codes for geomechanics applications. The inherent complexity associated with geo-engineering problems and the lack of suitable analysis tools prompted the development of FLAC, in 1986, and FLAC3D, in 1994. Today, both codes enjoy extensive application worldwide.

Dr. Bo Liu, a member of scientific committee for the 4th FLAC Symposium to be held in Spain in 2006, has given graduate-level FLAC numerical modeling course in China University of Mining and Technology (Beijing) for the past six years. Yanhui Han has worked on FLAC support and development for two years and now serves as the principal programmer for FLAC. The combination of their knowledge and experience provides the sound basis for the preparation of this first FLAC/FLAC3D book in China.

This volume provides a Chinese version of significant portions of the theoretical section, verification and example applications section, and user's guide section of the FLAC and FLAC3D manuals. In addition, the book also includes several practical applications in geotechnical engineering using FLAC/FLAC3D in China. This should provide a sound introduction to the capabilities and practical application of these codes for Chinese engineers. I recommend this guide for both engineers investigating the potential applications of FLAC and FLAC3D, and also new users learning to operate these codes.



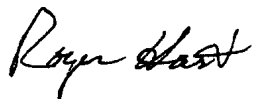
Principal, Itasca Consulting Group, Inc., Minneapolis, Minnesota, USA
Director of Software Services and Development

序

FLAC 和 FLAC3D 是二维和三维岩土力学有限差分计算机程序。岩土工程问题内在的复杂性及缺乏合适的分析工具推动了 FLAC(1986 年) 和 FLAC3D(1994) 的开发。今天,两种程序已经在全世界范围获得了广泛应用。

刘波博士是 2006 年西班牙第四届国际 FLAC 大会的科学委员会的委员,他在过去六年中一直在中国矿业大学(北京)开设 FLAC 数值模拟研究生课程;韩彦辉已从事 FLAC 系统开发与技术支持两年,目前是 FLAC 系统的首席程序员及系统管理员,他们的知识和经验为编著中国第一本介绍 FLAC 和 FLAC3D 的书籍奠定了极佳的基础。

本书涵盖了 FLAC 和 FLAC3D 理论、验证和应用实例及用户指南的主要内容,同时提供了 FLAC 和 FLAC3D 在中国岩土工程领域的多个应用实例,这为中国工程师提供了一本介绍两个程序的模拟能力和实际应用的极佳手册。我推荐这本书给那些正在调研 FLAC 和 FLAC3D 的潜在应用的工程师和正在学习使用程序的新用户。



Roger Hart 博士

Itasca 国际咨询公司副总裁兼软件开发部主任

美国明尼苏达州明尼阿波里斯市

A Brief History of FLAC^①

“FLAC” stands for Fast Lagrangian Analysis of Continua—but why “fast?” And is FLAC a finite difference or a finite element code? This book is a good opportunity to answer some of these questions for Chinese engineers and users; after all, some people would not exactly describe FLAC as fast, and others have called it a finite element code in the literature. FLAC’s ancestry can be traced to the 1960s, when I wrote traditional finite-difference (FD) codes, with rectangular grids and small strains. It was not until 1972, after meeting Mark Wilkins at a workshop in California, that FLAC’s future persona evolved. I was astonished by the ‘hydro codes’ developed by the U.S. National Laboratories. These codes could have elements of any shape, and could track impressively large distortions, using a general FD scheme developed by Mark. A year or two later, I was able to play with PISCES (a commercial hydro code) and apply it to cases like slope failure, hoping to compare the results to limit equilibrium methods. This was only partially successful, but I learned a lot about the method.

By simplifying the material models (omitting various energy terms, for example, that are unnecessary at low stresses), I wrote the codes DAMSEL and NESSI, which worked like PISCES but were about ten times faster; hence the source of the letter F in the name. Both codes used the original constant-strain quadrilateral, with an ‘hourglass correction’ scheme to deal with the two unconstrained modes. Then I had a nasty shock when applying NESSI to the problem of combined viscous and plastic flow. The anti-hourglass scheme completely dominated the response! I resolved never again to use constant-strain quadrilaterals; thus, FLAC elements are based on mixed discretization that avoids any correction scheme. However, FLAC still derives its equations by direct approximation of the governing differential equations, unlike the finite element approach. Therefore, it is strictly a finite difference code.

FLAC was born in the early days of Itasca, when the consulting business was uncertain and we had the idea that software would provide a steady ‘baseline’ income. Charles Fairhurst was very encouraging, and John Marham agreed to share the development costs. Looking back at version 1.0, I can hardly believe that anyone would buy it, because it did so little, and was really slow (despite the name). The current version 5.0 embodies far more physics and flexibility, and it appears to run about thousands times faster because of machine improvement since 1985. One drawback with this increased computer power is that people can more easily push the code to its limits. The double-precision arithmetic version was provided in version 4.0. In version 4.0 and later versions, a full graphical interface, the GIIC (Graphical Interface for Itasca Codes), makes all features in FLAC available by using graphical tools. No doubt many more changes will be necessary before FLAC finally dies of old age.

Peter Cundall

① Slightly modified from “FLAC and Numerical Modeling in Geomechanics, Detournay & Hart (eds) ©1999 Balkema, ISBN 90 5809 074 4”.

FLAC 简 史

“FLAC”代表“连续介质快速拉格朗日分析”——但为何说它“快速”呢？FLAC到底是有限差分程序还是有限元程序？本书在这些问题上为中国工程师和用户提供了很好的解答机会；不过，很多人并不认为 FLAC 是“快速”的，也有人在文献中称 FLAC 为有限元程序。FLAC 的起源可追溯到 1960 年代，当时我在使用正方形网格和小应变写用传统的有限差分程序。直到 1972 年我在加利福尼亚的一个会议上碰到 Mark Wilkins，FLAC 的雏形开始出现。我对美国一些国家实验室开发的程序感到很好奇，这些程序通过使用 Mark 的有限差分方法可以接受任意形状的单元，并能追踪大尺度扭曲。一两年以后，我开发了商业程序 PISCES 并使用它进行诸如边坡破坏之类的分析，希望能与极限平衡方法的结果相比较。这些尝试并不完全成功，但我对该方法有了更多的理解。

通过简化材料模型（例如忽略那些在低应力下不需要考虑的各种能量项），我又写了 DAMSEL 和 NESSI 程序，这两个程序与 PISCES 很相似但要快 10 倍；“FLAC”中的字母 F（快速）即由此而来。两个程序都使用常应变四边形单元，并用“沙漏校正”方法来处理两个无限制模式。但当使用 NESSI 来模拟联合粘性和塑性流动问题，我完全惊呆了。反“沙漏”方案完全支配了系统的反应！我从此再也没有使用常应变四边形单元；因此 FLAC 使用的是混合离散法，不需要任何校正方案。不过，我在 FLAC 中仍然对控制偏微分方程进行直接逼近来推导方程，这与有限元法不同。因此严格地说，FLAC 是有限差分程序。

FLAC 产生于 Itasca 公司初期，当时咨询业务时有时无，我们就想到软件可以提供稳定的“底线”收入。Charles Fairhurst 很鼓励这个思路，John Marham 也愿意分担开发费用。回头看 FLAC1.0 版本，我很难相信会有人愿意买，功能实在太少，速度实在太慢（除了名字）。目前版本 5.0 比 1.0 无论是在物理模型上还是在使用方便的角度，都比当初版本不知强了多少倍，由于计算机硬件的发展，速度也快了成千上万倍。计算机能力的提升也使人们很容易将程序用到极限。所以，在 4.0 版，我们提供了双精度版；在 4.0 及以后版本，我们开发了完全的图形用户界面，用户可以用图形界面完成 FLAC 的所有操作。毫无疑问，在其寿终正寝以前，FLAC 的面貌和功能还会有更多的改变。

Peter Cundall

前言(一)

FLAC 及 FLAC3D 是由国际著名学者、英国皇家工程院院士、离散元法的发明人 Peter Cundall 博士在 70 年代中期开始研究开发的面向土木建筑、采矿、交通、水利、地质、核废料处理、石油及环境工程的通用软件系统,是美国 Itasca 国际咨询集团公司的软件核心产品(包括:FLAC 及 FLAC3D、FLAC/SLOPE、UDEEC、3DEC、PFC2D、PFC3D)最知名的软件系统之一。FLAC(1986 年)及 FLAC3D(1994 年)已在全球七十多个国家得到广泛应用,在国际土木工程(尤其是岩土工程)的学术界和工业界赢得广泛的赞誉。

20 世纪 90 年代中期以来,我国高校开始引进 FLAC 及 FLAC3D 等 Itasca 系列软件,研究院所及工程公司也拥有相当数量的用户,土建、交通、采矿、地质、水利等工业部门在应用 FLAC 及 FLAC3D 系统进行工程设计计算及科学研究等,FLAC 及 FLAC3D 已逐渐成为我国岩土工程界发展最快、影响最大的软件系统之一。

十年前,我在准备博士论文时,采用 FLAC 进行数值计算,那时听说过 FLAC 的人可谓寥寥无几,对所面临的 FLAC 计算问题,常需尝试每一条 FISH 命令,屡试屡错才得以建立合理的模型和获得理想的结果,这也促使我在六年前试着为研究生开设 FLAC 及 FLAC3D 的相关课程,这样的努力一直延续下来。FLAC 及 FLAC3D 的英文版说明书篇幅超过了 4000 页,没有合适的参考书一直困扰 FLAC 及 FLAC3D 的用户和研究生们,我编写了简明讲义以解燃眉之急。

一年前,人民交通出版社的陈志敏编辑告诉我关于出版土木工程数值分析应用软件系列著作的想法,并邀我来执笔写关于 FLAC 的书籍,陈编辑的敏锐眼光和真诚打动了我。最初,我想写一本小册子,介绍我们近年运用 FLAC 及 FLAC3D 的研究成果、二次开发及在地铁、边坡、基坑和矿山工程的 10 余个应用实例。正因为我国还没有一本介绍 FLAC 的书籍,这与 FLAC 在中国快速发展的现状是极不相称的,出版社更期望能写一本内容包括理论、实例与应用指南的书。于是,我把这想法告诉了远在美国 Itasca 工作的朋友韩彦辉,他是 FLAC 的首席程序员和高级系统管理员,他比任何用户更深入理解 FLAC 的内核,多次越洋长谈坚定了我们编著这本书的信心。更值得一提的是,Itasca 国际咨询集团公司的总裁兼首席执行官 John J. Markham 先生对此表现出极大的关注与支持,2004 年 12 月 16 日清晨,我庆幸没有将一个根本不熟悉发送者的电子邮件作为垃圾邮件删除,那是 John J. Markham 发来的邀请我访问他的 Itasca 总部和对我们准备出版第一本关于 FLAC 及 FLAC3D 的中文书籍的支持。Itasca 的副总裁兼软件开发部主任 Roger Hart 博士以及 FLAC 的创始人 Peter Cundall 博士共同讨论书稿提纲并提出有益的建议都是对出版此书的莫大支持。

本书系统介绍了 FLAC 及 FLAC3D 的基础理论、应用实例与应用指南,也包括

在我国多个工程应用实例与研究项目的研究成果。全书分为:理论篇(第1章~第6章)、实例篇(第7章~第19章)和应用指南篇(第20章~第33章)。理论篇涵盖了FLAC及FLAC3D的基本原理,内容包括:FLAC显式有限差分法的理论背景;材料模型的本构理论和数值实现;流体-固体相互作用分析;岩土与结构相互作用的结构单元模型;FLAC内置的FISH语言;FLAC可选模块的基础理论等。实例篇介绍了FLAC及FLAC3D在岩土力学与工程领域的应用实例,包括:地基及基础工程计算;土力学的固结问题;浅层承压水井抽水计算;排水与不排水土的三轴压缩的数值试验;石油工程中的钻孔孔隙弹性响应分析;岩土边坡的稳定性分析;基坑开挖与土钉墙施工过程模拟;堤坝的地震响应分析;竖向及水平荷载作用下混凝土桩基计算;浅埋隧道的开挖与支护;盾构法隧道基础上扩挖地铁车站工程分析;地铁隧道穿越高层建筑桩基托换工程分析;复杂条件下地铁施工诱发地层沉降分析;FLAC3D二次开发等内容。应用指南篇分FLAC应用指南与FLAC3D应用指南两部分,内容包括:FLAC和FLAC3D概述及特点;开始应用FLAC的技巧;采用FLAC和FLAC3D解决问题的过程与步骤;FISH入门指南;建模的原则;一般方法及相关技巧等。对于初学者,建议先阅读本书第三篇,获得FLAC及FLAC3D的基本知识、基本概念,了解如何运用FLAC或FLAC3D建立简单的模型,然后再阅读理论篇,并结合实例篇的示例进行演算,并建立符合要求的计算模型。

随书所附光盘提供了学习FLAC及FLAC3D的应用程序系统、实例与指南,软件系统可实现除计算循环功能以外的其他全部功能(如建模前处理、结果后处理等),同时提供了Itasca系列软件在不同领域应用的众多演示实例,方便读者学习参考。

本书理论联系实际,内容系统全面,既满足初学者的要求,也为具有一定基础的读者深入研习FLAC和FLAC3D提供了详尽的理论背景与应用实例,可供土建、交通、采矿、地质、水利、石油、工程力学等专业从事岩土工程数值计算、工程设计与研究的工程师和在校师生使用,也可作为相关专业教材或研究生教学参考书。

本书由刘波和韩彦辉编著。第1、2、4、7、8、9、12、13、14、15、16、17、18、19、23、24、25、28章由刘波执笔;第3、11、20、31、32、33章由韩彦辉执笔;第5章由刘波、陈军、赵宏奎执笔;第6、29章由刘波、刘纪峰执笔;第10章由刘波、高霞执笔;第22章由刘波、张定春执笔;第21章由刘波、邓永红、黄浩执笔,第26、27、30章由刘波、李涛执笔。研究生李幻、吴盈敏、王新会、张会芝、潘强、陈宝军等为部分英文资料翻译、插图绘制等做了大量工作,在此一并致谢。

作者衷心感谢美国Itasca国际咨询集团公司副总裁兼软件开发部主任Roger Hart博士百忙之中为本书作序,感谢英国皇家工程院院士Peter Cundall博士为本书写的“A Brief History of FLAC”。感谢香港大学李焯芬院士、岳中琦教授为作者在港大工作及应用FLAC/FLAC3D开展岩土力学与工程研究提供的资助与指导。感谢香港理工大学殷建华教授、清华大学杨强教授为作者提供有益的建议与帮助。感谢英国诺丁汉大学余海岁教授在作者进行地铁隧道施工沉降控制研究方面给予的帮助和有益的建议。感谢中国科学院院士山东科技大学宋振骥教授、中国建筑工程总公司陈祥福教授给予作者的关怀与指教。在这里,还要特别感谢作者的导师陶龙光教授、李先炜教授多年的教诲与关爱。感谢中国矿业大学(北京)杨仁树教

授、何满潮教授、高全臣教授、单仁亮教授、彭苏萍教授、姜耀东教授、周宏伟教授、江玉生博士、侯公羽博士、杨晓杰博士等在作者课题研究和编著本书时给予的大力帮助与指教。

感谢广州地铁总公司地铁设计院赵德刚总工程师、李志南工程师、广州建筑科学研究院唐孟雄副院长、深圳地铁总公司陈湘生总工程师、广州建设委员会李希平处长等在作者的课题研究方面给予的支持与帮助。感谢福建省工程咨询公司强天弛博士、上海隧道公司卓发成硕士、北京建工集团丁城刚硕士、北京理正软件公司叶圣国硕士、中国建筑国际工程公司严继华硕士、华南理工大学邓飞皇博士在资料收集或项目研究方面付出的努力。

作者十分感谢国家自然科学基金(50304012)的资助,衷心感谢人民交通出版社陈志敏编辑的策划和为本书所付出的辛勤劳动,使本书得以顺利出版。

作者深感编著国内第一本系统介绍 FLAC 的书籍难度较大,由于写作时间仓促以及作者的水平所限,书中难免存在缺点和错误,敬请各位读者批评指正,或请致电 flacman@163.com。

刘 波

2005 年 6 月 18 日于北京

前言(二)

当我 2003 年夏季很兴奋地打电话告诉国内以前的师尊、同事、同学和从事岩土工程的朋友说我刚刚加盟了一个富有传奇色彩的公司——Itasca 国际咨询和软件开发公司 (Itasca Consulting Group, Inc) 时, 结果很令我沮丧, 因为他们中间很多人都未曾听说过 Itasca 咨询公司。不过令我感到欣慰的是, 他们中间没有人不知道 FLAC, 而我到 Itasca 咨询公司的主要任务就是维护和开发 FLAC。的确, 作为世界范围内应用最为广泛的通用性岩土工程数值模拟软件之一, FLAC 已经在六七十个国家得到普遍应用, 其知名度远远超过了开发者 Itasca 咨询公司 (Itasca 咨询公司目前仅在十来个国家设有咨询分公司)。

从一个在读岩土力学博士生到 FLAC 系统主管, 我对 FLAC 的认识过程如同与一位新妇磨合, 开始时她给人的感觉是神秘可爱, 然后就变得性情难测不易沟通, 最后绞尽脑汁多番揣摩终于接近和谐的境地。根据我自身的经验, 当你用 FLAC 时间越久, 对 FLAC 了解越多, 就越爱不释手, 有一次和 Roger Hart 博士交流这种感受, 也引起他强烈共鸣。这可能也是 FLAC 为什么拥有那么多长期爱好者的原因吧。

心急的初学者常常想知道需要学习多长时间才能将 FLAC 付诸实践, 我刚到 Itasca 咨询公司时也曾问过 FLAC 的创造者 Peter A. Cundall 博士, 他认为如果全身心投入会需要三到六个月才能真正开始理解 FLAC (当然他是指阅读理解源程序所需的时间)。需要提醒一下那些将把 FLAC 用于研究的学者, 由于 FLAC 是一个全开放的系统, 他们会发现 FLAC 给他们提供了如此广阔的研究平台, 不仅允许他们进行从简单的重力加载沉降计算到复杂的几乎所有可能的耦合模拟, 甚至还可以帮助他们实施自己发展的当今世界上最复杂的本构模型。对他们来说, FLAC 可能更象二锅头或万宝路, 一旦上瘾便欲罢不能。我第一次听说 FLAC 可以追溯到 1995 年, 当时刘波博士正在为他的博士帽奋斗, 开始用 FLAC 进行岩土数值模拟, 而我那时正忙于准备赴美留学, 没有深究, 只是一个道听途说者。十年前的初学者和道听途说者现在正竭尽全力介绍 FLAC 给中文读者, 也算得上是 FLAC 魅力的一个实证案例吧。

鉴于我们在书中已经详细阐述了 FLAC 的理论背景、验证及应用实例, 我这里只想从 FLAC 系统程序员的角度提一下两种 FLAC 内部的数据结构, 因为它们是实现 FLAC 的内置数值实现和进行用户开发的关键。首先是网格点和网格域偏移量 (Offset), 与 FLAC 主网格计算有关的信息一般都储存在网格点和网格域偏移量下, 例如位移、速度、加速度等“点”变量储存在不同网格点偏移量下; 而密度、孔隙率、应力和应变等“域”变量则储存在不同网格域偏移量下。求解不同的问题需要 FLAC 动态内存管理员在内存中为网格点和网格域预设不同数目偏移量, 这就是在

设置网格以前需要决定配置(CONFIG)的原因。其次是链表(LinkedList),多数用于计算或记录的数据结构如结构单元信息、界面信息、历史记录及表格等都是以链表形式储存在 FLAC 主内存中,当这些数据结构向 FLAC 申请空间时,FLAC 的动态内存管理员就根据它们需要的空间大小和 FLAC 主存的现状,将合适的内存块的首地址赋给这些数据结构的当前指针,当这些数据被删除和释放时,FLAC 的动态内存管理员则将它们的空间回收。通过 FLAC 的 FISH 手册可以清晰地看出这些数据结构在 FLAC 中的具体使用。

最后,我想说的是,我们确信并期望研习 FLAC 的学者能从本书获取所需的知识和技巧,这也是我们最感欣慰的。

韩彦辉

于明尼苏达州明尼阿波里斯市

2005 年 5 月

目 录

理 论 篇

第 1 章	FLAC 理论背景——显式有限差分法	(3)
1.1	FLAC 名词概念解释	(3)
1.1.1	有限差分法	(3)
1.1.2	显式的时程方案	(3)
1.1.3	拉格朗日分析	(4)
1.1.4	塑性分析	(5)
1.2	场方程	(5)
1.2.1	运动和平衡	(5)
1.2.2	本构关系	(6)
1.2.3	边界条件	(6)
1.3	FLAC 的数值公式	(7)
1.3.1	FLAC 网格	(7)
1.3.2	有限差分方程	(7)
1.3.3	力学阻尼	(11)
1.3.4	时步确定及解的稳定性问题	(14)
第 2 章	材料模型的本构理论和数值实现	(16)
2.1	零模型	(16)
2.2	弹性模型	(16)
2.2.1	各向同性弹性模型	(16)
2.2.2	横观各向同性弹性模型	(17)
2.3	摩尔—库仑模型	(18)
2.3.1	增量弹性法则	(18)
2.3.2	屈服函数和势函数	(19)
2.3.3	塑性修正	(20)
2.4	德鲁克—普拉格 (Drucker-Prager) 模型	(21)
2.4.1	增量弹性法则	(22)
2.4.2	屈服函数和势函数	(22)
2.4.3	塑性修正	(24)
2.5	节理化模型	(25)

2.6 应变硬化—软化模型	(28)
2.6.1 硬化—软化参数	(29)
2.6.2 用户自定义函数的材料模型	(29)
2.7 双线性应变硬化—软化的节理化模型	(30)
2.7.1 岩土介质的破坏判据和流动法则	(30)
2.7.2 弱面的破坏判据和流动法则	(32)
2.7.3 大应变模式中方位角的更新	(34)
2.7.4 硬化参数	(34)
2.8 双屈服模型	(35)
2.8.1 增量弹性法则	(35)
2.8.2 屈服函数和势函数	(36)
2.8.3 硬化/软化参数	(36)
2.8.4 塑性修正	(37)
2.9 修正的剑桥粘土模型	(39)
2.9.1 屈服函数	(39)
2.9.2 硬化—软化准则	(40)
2.9.3 初始应力状态	(40)
2.9.4 确定输入参数	(40)
2.10 霍克—布朗模型	(43)
2.10.1 基本方程	(43)
2.10.2 流动法则	(44)
第3章 流体—固体相互作用分析	(46)
3.1 简介	(46)
3.2 流体—固体相互作用数值表达	(47)
3.2.1 本构定律:建立单元“刚度矩阵”	(48)
3.2.2 非饱和流动	(48)
3.2.3 连续性方程	(49)
3.2.4 部分饱和节点的连续性	(49)
3.2.5 数值计算的稳定性:流体时步	(50)
3.2.6 控制方程的连续性表达式	(50)
3.3 建模方法	(52)
3.3.1 单纯流动和流—固耦合问题的解决办法	(52)
3.3.2 计算的时标	(52)
3.3.3 选择一种完全耦合分析的模拟方法	(55)
第4章 岩土与结构相互作用—结构单元	(58)
4.1 梁(Beam)单元	(58)
4.1.1 公式推导	(58)
4.1.2 梁单元的参数	(60)

4.2 锚索(Cable)单元	(61)
4.2.1 公式推导	(61)
4.2.2 锚索单元的参数	(64)
4.3 桩(Pile)单元	(66)
4.3.1 公式推导	(66)
4.3.2 桩单元的材料参数	(69)
4.4 二维岩石锚杆(Rockbolt)单元	(70)
4.4.1 公式推导	(70)
4.4.2 岩石锚杆单元的参数	(70)
4.5 二维条形锚(Strip)单元	(71)
4.5.1 公式推导	(71)
4.5.2 条形锚单元的参数	(72)
4.6 二维支撑(Support)单元	(73)
4.6.1 理论推导	(73)
4.6.2 支撑(Support)单元特性	(73)
4.7 三维壳体(Shell)单元	(74)
4.7.1 三维壳体结构单元	(74)
4.7.2 三维壳体结构单元参数	(75)
4.8 衬砌(Liner)单元	(76)
4.8.1 力学特性	(76)
4.8.2 衬砌响应的监控	(78)
4.8.3 衬砌单元的参数	(78)
4.9 三维土工格栅(Geogrid)单元	(79)
4.9.1 力学性能	(79)
4.9.2 土工格栅单元的参数	(81)
第5章 FLAC 内置的 FISH 语言	(82)
5.1 FISH 语言的语法规则	(82)
5.1.1 命令行	(82)
5.1.2 函数名、变量名和潜在的冲突	(83)
5.1.3 变量作用范围	(86)
5.1.4 函数组成、赋值和调用格式	(86)
5.1.5 数据类型	(87)
5.1.6 算术表达式和类型转换	(88)
5.1.7 字符串	(89)
5.1.8 删除和重定义 FISH 函数	(90)
5.1.9 FISH 控制语句	(91)
5.2 FLAC 与 FISH 的交互作用	(92)
5.2.1 FISH 调用	(92)

5.2.2	FLAC 明确定义的标量变量	(93)
5.2.3	网格点变量与单元变量	(94)
5.2.4	应变计算	(94)
5.2.5	FLAC 本构模型变量	(95)
5.2.6	Table 特殊函数	(95)
5.2.7	直接访问内存的特殊函数	(96)
5.2.8	FISH 的输入/输出程序	(96)
5.3	基于 FISH 的用户自定义本构模型	(97)
5.3.1	概述	(97)
5.3.2	模型的定义和使用	(98)
5.3.3	用户定义局部特性变量	(98)
5.3.4	状态变量	(100)
5.3.5	UDM 中的变量 mode 的使用	(101)
5.3.6	子单元求平均数的变量——zsub 变量的使用	(102)
5.3.7	本构模型中的 FRIEND 函数	(103)
5.3.8	提示和建议	(105)
第 6 章	FLAC 可选模块	(106)
6.1	热力学分析	(106)
6.1.1	简介	(106)
6.1.2	热力学模型描述	(106)
6.1.3	热对流	(109)
6.2	蠕变分析	(110)
6.2.1	简介	(110)
6.2.2	蠕变本构模型的描述	(110)
6.3	两相流分析	(117)
6.3.1	引言	(117)
6.3.2	数学表达式	(118)
6.4	动力学分析	(122)
6.4.1	概述	(122)
6.4.2	等线性法	(122)
6.4.3	动力方程	(124)
6.4.4	动态多步	(125)
6.4.5	滞后阻尼的理论背景	(126)
6.4.6	瑞利(Rayleigh)阻尼	(127)
6.4.7	静态边界	(129)
6.4.8	自由场边界	(130)
6.5	基于 C++ 的用户自定义模型 UDM	(131)
6.5.1	简介	(131)

6.5.2 用户自定义模型方法	(131)
6.5.3 数值实现	(136)

实 例 篇

第 7 章 摩尔—库仑材料上的条形及圆形基础计算	(145)
7.1 问题描述	(145)
7.2 理论解	(145)
7.3 FLAC 模型	(146)
7.4 结果及讨论	(147)
7.4.1 条形基础问题	(147)
7.4.2 圆形基础问题	(149)
7.5 FLAC 数据文件	(150)
第 8 章 一维固结问题	(153)
8.1 问题描述	(153)
8.2 理论解	(153)
8.3 FLAC 模型	(154)
8.4 结果和讨论	(155)
8.5 数据文件“H1.Dat”	(156)
第 9 章 浅层承压水井抽水计算	(161)
9.1 问题描述	(161)
9.2 理论解	(161)
9.3 FLAC 模型	(163)
9.4 结果和讨论	(163)
9.5 数据文件“H4.DAT”	(165)
第 10 章 剑桥—粘土排水与不排水三轴压缩的数值试验	(170)
10.1 问题描述	(170)
10.2 理论解	(170)
10.3 FLAC 模型	(173)
10.4 结果及讨论	(173)
10.5 建模数据文件	(181)
10.5.1 数据文件“CAM1.DAT”	(181)
10.5.2 数据文件“CAM2.DAT”	(184)
10.5.3 数据文件“YIELD.FIS”	(187)
第 11 章 钻孔的孔隙弹性响应分析	(189)
11.1 问题描述	(189)
11.2 理论解	(189)
11.3 FLAC 模型	(192)
11.4 结果讨论	(193)
11.5 建模数据文件	(195)