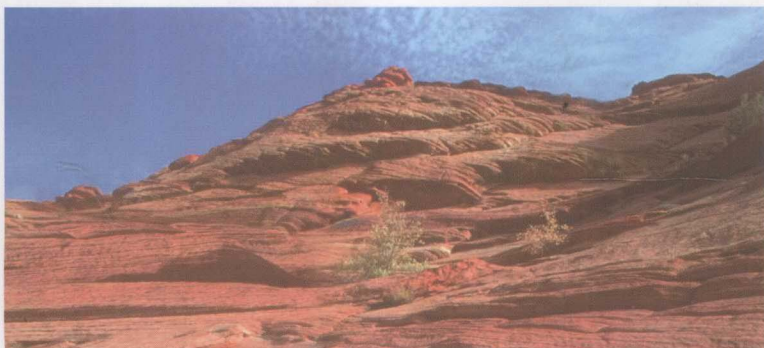


河海大学“211工程”三期资助研究生系列教材



岩土工程 数值方法与应用

Numerical Method in Geomechanics
Engineering and Application

主 编 卢廷浩

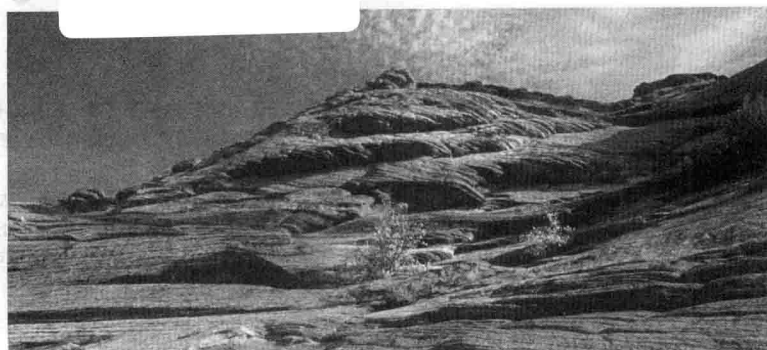
副主编 刘 军



河海大学出版社
HOHAI UNIVERSITY PRESS

河海大学“211工程”三

材



岩土工程 数值方法与应用

藏书章

Numerical Method in Geomechanics
Engineering and Application

主编：卢廷浩

副主编：刘 军

编写：卢廷浩

朱俊高

刘 军

孙少锐

郭海庆

陈育民

彭 劼

费 康

倪小东



河海大学出版社
HOHAI UNIVERSITY PRESS

内 容 提 要

本书作为研究生岩土数值分析课程的教材,适合于水利水电工程、土木工程、港口与航道工程、公路铁路工程、矿山工程、城乡规划与市政工程、能源、国防等行业相关专业的研究生使用。也可供相关专业教师、博士生和工程技术人员阅读参考。

全书共分 10 章,内容包括:绪论,滑移线理论与特征线法,土体极限分析法,有限元法,离散元法,非连续变形分析方法(DDA),岩土工程参数反分析法,FLAC3D 软件应用与开发,ABAQUS 软件应用与开发,PFC 软件应用与开发。每章内容相对独立,自成体系,并给出了应用实例。各院校可根据相关专业要求有侧重地选择部分内容进行教学。

图书在版编目(CIP)数据

岩土工程数值方法与应用/卢廷浩主编. —南京:
河海大学出版社, 2012. 12
ISBN 978-7-5630-3224-2

I. ①岩… II. ①卢… III. ①岩土工程—数值
方法—研究生—教材 IV. ①TU45

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2012)第 271266 号

书 名	岩土工程数值方法与应用
书 号	ISBN 978-7-5630-3224-2/TU·95
责任编辑	龚 俊
封面设计	黄 煜
出版发行	河海大学出版社
地 址	南京市西康路 1 号(邮编:210098)
电 话	(025)83737852(总编室) (025)83722833(发行部)
经 销	江苏省新华发行集团有限公司
排 版	南京理工大学资产经营有限公司
印 刷	江苏农垦机关印刷厂有限公司
开 本	787 毫米×960 毫米 1/16 21.5 印张 398 千字
版 次	2012 年 12 月第 1 版 2012 年 12 月第 1 次印刷
定 价	39.00 元

前 言

岩土工程的力学分析在水利水电、土木、矿山、能源、交通、港口与航道、城乡建设、国防等多种行业都有广泛的涉及。由于岩土工程具有多样性和复杂性,其力学特性分析很难求得严密的解析解,因而岩土工程数值方法(简称岩土数值方法)应运而生并在各种工程建设中得到了广泛应用。岩土数值计算结果对于指导工程规划、设计、施工提供了强有力的支撑,同时也为学者和工程师们提供了施展才华的舞台。有理由相信,现代数学、力学、计算机和计算技术的快速发展必将为岩土数值方法开拓更为广阔的发展空间和应用前景。

岩土数值方法已作为许多院校岩土工程专业与相关专业研究生的必修课程,是研究生所应具备的知识体系的重要部分。尽管各校的学科发展侧重点或者服务的工程对象有所不同,教学内容的选择不尽相同,但一些基本内容的讲授大体是一致的,并随着时代的发展而有所更新。近年来有关教材的相继问世就是最好的说明。

为进一步提高人才培养质量,研究生课程教学应紧跟学科发展步伐,教材与教学内容必须形成体系。作为国家重点学科,河海大学岩土工程研究所教师在五十余年研究生教学经验的基础上,结合学科发展趋势,对讲义教材、科研新成果和软件应用进行了系统的总结,决定扩充更新岩土数值分析课程的教学内容,为此组织编写这本《岩土工程数值方法与应用》教材。

本书的基本特点是:(一)尽可能反映学科最新研究成果和发展趋势,力求较全面体现岩土数值方法的基本框架,包括了常用的“新”、“老”数值方法基本内容和常用商业软件应用;(二)符合循序渐进的认知思路,深入浅出,理论介绍和实际应用并重;(三)在兼顾相关行业广泛适用性的同时,突出水利水电特色;(四)结合实例阐述岩土数值方法的基本原理和常用软件的运用,便于教和学。

本书是全体编写人员齐心协力工作的成果,付梓之际,衷心感谢河海大学研究生院的资助和河海大学出版社的辛勤工作。

本书编写人员的分工是:卢廷浩(前言,第一章,第二章,第三章),朱俊高(第四章),刘军(第五章),孙少锐(第六章),郭海庆(第七章),陈育民(第八章),彭飏、费康(第九章),倪小东(第十章)。由卢廷浩担任主编,刘军担任副主编,负责统校工作。

本书可作为有关专业研究生岩土工程数值方法与应用相关课程的教材,也可供相关专业教师、博士生和工程技术人员参考。限于编者水平,本书难免有不妥和疏漏之处,敬请使用和阅读本书的老师、同学及工程师们指正。

编 者

2012年秋于南京清凉山麓

目 录

第一章 绪论	1
第一节 岩土工程问题的基本特点	1
第二节 岩土工程数值分析发展的必然性	3
第三节 岩土工程数值分析方法类型简介	4
第四节 学习与应用岩土数值分析方法应注意的问题	7
第二章 滑移线理论与特征线方法	10
第一节 滑移线概念	10
第二节 应力平衡方程的特征线方程及差分解法	12
第三节 边值问题处理	17
第四节 条形基础地基极限承载力解答	21
第五节 土坡稳定问题解答	27
第六节 轴对称情况下的极限平衡解答	31
第七节 小结与讨论	33
第三章 土体极限分析法	34
第一节 概述	34
第二节 极限分析上下限定理	34
第三节 流动规则与能量耗散率	40
第四节 地基极限承载力	44
第五节 边坡稳定问题	48
第六节 小结与讨论	53
第四章 岩土工程有限元法	55
第一节 有限元原理及其在岩土工程中的应用简介	55
第二节 非线性有限元求解方法	58
第三节 有限元分析中常见问题的处理	74
第四节 土石坝应力变形有限元计算	80

第五节	接触面的有限元模拟	86
第六节	基坑开挖的有限元计算	92
第七节	土体固结有限元计算	93
第八节	小结与讨论	98
第五章	离散元法	100
第一节	概述	100
第二节	颗粒离散元法的基本原理	102
第三节	块体元离散元法的基本原理	113
第四节	算例	124
第五节	离散元法在岩土工程中的应用	126
第六节	小结与讨论	130
第六章	DDA 方法及其在岩土工程中的应用	135
第一节	概述	135
第二节	块体的位移和变形	137
第三节	单一块体的应力、应变及荷载分析	142
第四节	块体系统运动学	149
第五节	单纯形积分	169
第六节	DDA 分析的几个实例	171
第七节	小结与讨论	172
第七章	岩土工程参数反分析方法	175
第一节	概述	175
第二节	反分析的基本理论	179
第三节	物理力学参数反分析	191
第四节	渗透参数反分析	198
第五节	小结与讨论	208
第八章	FLAC3D 软件应用与开发	210
第一节	FLAC3D 功能和特点	210
第二节	FLAC3D 的前后处理	213
第三节	FLAC3D 的本构模型	220
第四节	FLAC3D 本构模型的二次开发	223

第五节	FLAC3D 算例	228
第六节	小结与讨论	245
第九章	ABAQUS 软件应用与开发	248
第一节	ABAQUS 基础与功能	248
第二节	岩土工程中常用的本构模型	255
第三节	ABAQUS 算例	262
第四节	小结与讨论	288
第十章	PFC 软件应用与开发	289
第一节	PFC 功能和特点	289
第二节	PFC 模拟的基本原理	291
第三节	PFC 基本操作	296
第四节	PFC 应用举例	320
第五节	小结与讨论	335

第一章 绪 论

第一节 岩土工程问题的基本特点

岩土工程是在工程建设中有关岩石或土的利用、整治或改造的科学技术,是以工程地质学、土力学、岩体力学及基础工程学为理论基础的技术学科。岩土材料是一种天然形成的地质体,是自然产物。在漫长的历史进程中,人类的生产生活所经历的工程建筑史就是对岩土体开发利用的过程。人们以岩土体作为建筑物地基,也作为建筑材料使用,岩土体还是人工结构的环境。

岩土工程问题是多种多样的,其解决的方法也具有多样性和复杂性。

一、工程类型的多样性

城乡建设的快速发展,土木水利工程的功能化、城市立体化、交通高速化,以及改善综合环境的人性化成为现代土木水利工程建设的特點。人们将不断拓展新的生存空间,水利水电、交通、矿山、能源、港口与航道、城乡建设、国防等领域都广泛应用岩土工程学科的相关成果。这些行业可能会在各种地点建造工程,且可能遇到各种类型的地基或地质环境。针对不同工程 and 不同地质条件又会选择不同的基础或结构形式,还会开挖隧道、开挖深基坑和建设地下工程,以及筑坝、筑路,河岸与边坡治理等等,不胜枚举。

对于不同地基或地质环境和不同的工程类型,设计施工时在了解岩土体的基本性质和工程要求的基础上,原则上都必须同时考虑到:稳定或平衡问题;应力变形与固结问题;地下水与渗流问题;水与土(岩)相互作用问题;土(岩)与结构相互作用问题;土(岩)的动力特性问题等。尽管不同的地质环境、不同的工程类型的侧重点不同。

二、材料性质的复杂性

岩土是组成地壳的任何一种岩石和土的统称。岩土可细分为坚硬的(硬岩)、次坚硬的(软岩)、软弱联结的、松散无联结的和具有特殊成分、结构、状态和性质的五大类。在我国,习惯将前两类称为岩石,后三类称为土,统称之为“岩土”。其中,“土”包括自然形成的,也应包括人类生产活动所产生的人为土,例如,岩石开挖料、

建筑垃圾、尾矿等。岩土既可能以松散堆积物的土体形式存在,也可能以相对完整的岩体存在。而天然岩体一般存在各种随机结构面,导致其力学行为异常复杂。当岩体“破碎”时,很难区分其属于岩体还是土体,需要根据地质体性质和经验作出判断和给予恰当描述。现场岩土体大都是非均匀、非连续介质,呈现出空间的不连续性、几何形状的随机性、矿物成分和结构组成的多样性以及水环境因素的复杂性,往往表现出强烈区域性(个性)特征。岩土材料往往呈现结构性和各向异性;岩土材料变形与强度还可能随时间变化,即流变性质等等。

因此,岩土材料的力学行为表现出强烈的非线性特征,一般不是线性材料,其应力应变关系远比单纯的线弹性关系复杂。

为了如实地表达不同区域的岩土工程问题,必须进行必要的勘察、实验,使用一些能够描述各种岩土体材料基本性质的非线性或弹塑性本构模型。当前,岩土体本构模型的建立和应用已经成为近代岩土工程的重要研究领域,至今人们建立的土体的本构模型不少于百种。当然,试图建立能适用于各类岩土工程的理想本构模型是困难的,甚至是不可能的。所以,一方面应努力建立用于针对实际工程问题的实用模型;另一方面应构建能够反映某类岩土体应力应变特性的理论模型,以及相关的实验测试研究。

三、荷载条件的复杂性

针对不同的使用目的,人们创造出多种多样的建筑物。不同的工程因其型式、使用要求的不同,或者施工方式不同等,其荷载条件复杂多样,包括静力和动力荷载。例如,房屋建筑对地基的作用,以建筑物荷载、风荷载为主;基坑开挖、隧洞开挖主要是应力解除;土石坝施工是逐级加载以自重为主;而土石坝运行期则是水压力和渗流为主;地震、爆炸则是突加动力荷载等等。

四、初始条件与边界条件的复杂性

工程地质和水文地质条件不同,周边环境不同,造成各种问题的初始条件和边界条件不同,有时甚至比较模糊。例如,土体的初始应力或初始变形往往很难准确确定。边界条件的确定有时也难以完全符合实际,需要进行适当的简化或近似处理。求解工程问题和进行数值模拟时应综合考虑各方面因素,尽可能确切反映各种复杂的初始条件与边界条件。

五、相互作用问题

相互作用包括两种类型:一是土(岩)水相互作用,再是土(岩)与结构或颗粒(岩块)相互作用。岩土体中水的存在和流动对其性质将产生影响,有时这种影响

是巨大的,不可忽视的。水的存在除了产生浮力、水压力等静水力学特征外,当发生渗流时将对岩土体产生超静孔隙水应力和渗流力。对于细粒土,含水率的变化会使土的物理力学性质发生变化,对于某些特殊土的影响则更为显著。对于粗粒土,适当的洒水可以增加土的压实性,土石坝初次浸水,会产生湿化变形。岩体中水的存在和渗流现象,除了影响应力变形外,还可能发生缓慢而持续的化学作用,进一步影响岩体的渗流和应力变形。

除了少数堤坝类的“土工建筑物”外,一般都存在结构物,分析时将岩土体与结构物视为一完整体系,即岩土体与结构处于一个共同作用系统。由于岩土体尤其是土体与结构的性质有很大的差异,在相互作用过程中通过力的传递并最终达到变形协调,因此存在岩土体与结构的相互作用问题。例如,地基、基础、上部结构相互作用;土石坝防渗墙与地基及坝体的相互作用;桩、挡土墙、锚杆、加筋材料等与土(岩)的相互作用。此外,裂隙岩体的岩块间的相互接触也是一种相互作用。

第二节 岩土工程数值分析发展的必然性

如前所述,岩土体作为一种地质体,其天然状态、性质使得材料的本构关系异常复杂,其上建筑物的荷载条件,边界条件与初始条件,土(岩)水相互作用以及土(岩)与结构或颗粒(岩块)间相互作用的力学描述也非常困难。

在理论上,通过建立运动微分方程(动力或静力),几何方程(小应变或大应变)和本构方程,对于渗流固结问题还需运用有效应力原理并考虑连续方程,能够求得精确解析解。为尽可能求得问题的“精确”解答,人们的追求与选择大致有三个梯次,退而择之。

(1) 建立严格的控制物理方程(微分方程或微分方程组),根据初始条件和边界条件求得问题的严密理论下的解析解。由于实际工程问题的复杂性,如愿的结果极少。某些问题定性解答尚且难以把握,较为精确的定量解答就更不易获得。

(2) 为了获得较为精确的理论解,人们不得不作一些必要的简化假设,建立控制物理方程,希望得到某种近似程度的“严密”解析解,其中一些解答与实际情况能够较好的近似,例如 Terzaghi 一维固结解答;有一些解答则部分符合实际,例如 Winkler 弹性地基上的梁和板解答,较为适用于极软弱黏土地基;而相当多的情况可能与实际有很大的出入。虽然有些问题具有相当的复杂性,但适当的简化假设也能够获得较为符合实际的解析表达式,例如 Biot 三维固结方程,但也只有少数特殊情况才能求得解析解。

(3) 既然严密解答难以获得,那么寻求解答的途径只有通过简化假设的基础上得到的控制物理方程(微分方程或微分方程组),寻求数值解。如前所述,由于

岩土工程问题的复杂性,很多情况不能得到控制微分方程的解析解答,因此人们不得不转而寻求数值解。希望获得近似数值解的愿望就成为必然,也就注定了岩土工程数值分析的地位,这是一个从定性到定量的过程。幸运的是,数学和力学理论的发展、计算技术和计算机的快速发展为解决复杂岩土工程问题提供了有效的数值分析方法和手段。近年来,许多数值方法应运而生并日趋完善,并得到广泛应用,从而解决了大量的工程问题。数值分析方法为进一步发展岩土工程学科提供了更广阔的空间,也为学者和工程师们拓展了施展才华的舞台。

第三节 岩土工程数值分析方法类型简介

数值分析方法是随着工程问题的提出及计算机技术发展而形成的一类计算方法,目前已存在多种岩土工程数值分析方法。

20 世纪 20 年代逐渐发展起来的主要用于土体极限状态的分析方法——滑移线理论与特征线法(Characteristics Line Method,简称 CLM)和极限分析法(Limit Analysis Method,简称 LAM),在实际工程问题中得到广泛应用。随着人们对岩土性质研究的深入,20 世纪 60 年代后逐步发展的岩土工程数值分析方法已有多种。例如,有限元法(Finite Element Method,简称 FEM),有限差分法(Finite Different Method,简称 FDM),边界元法(Boundary Element Method,简称 BEM),离散元法(Discrete/Distinct Element Method,简称 DEM),非连续变形分析法(Discontinuous Deformation Analysis,简称 DDA),数值流形元法(Numerical Manifold Method,简称 NMM)等。此外,随着人们对提高数值计算精度的期望以及现场测试水平和计算技术的提高,岩土参数反演分析法(Inverse Analysis Method,简称 IAM)或反分析法(Back Analysis Method,简称 BAM)也同时得到了充分重视和发展。有理由相信,现有的方法将会进一步完善,而且还有可能产生各种新的数值方法,例如复合问题多变量的耦合方法。

各种数值方法都要遵循控制方程(微分方程或微分方程组),同时将计算域进行离散化的求解方法。数值分析方法总体上可以分为两大类:一类是连续介质力学方法,另一类则是非连续介质力学方法。期望研究生在学习与运用这些数值方法的基础上,能够有所完善与发展。从教学角度考虑,要求学生既掌握一些常用的数值方法,也了解一些新的数值方法,还要注意每种数值方法的适用范围及各自特点。本教材介绍其中几种有代表性的数值方法:滑移线理论与特征线方法(CLM);极限分析法(LAM);有限单元法(FEM)(包括土体应力变形、固结有限元);离散单元法(DEM);非连续变形分析法(DDA);岩土数值反分析法(BAM)。

土力学中的滑移线理论是在经典塑性力学的基础上发展起来的。假定土体为理想刚塑性体,强度包线为直线且服从正交流动规则的标准库仑材料。滑移线理论是基于平面应变状态的土体内当达到“无限”塑性流动时,塑性区内的应力和应变速度的偏微分方程是双曲线方程这一事实,应用特征线理论求解平面应变问题极限解的一种方法,称为滑移线法(CLM)。20世纪20年代,人们在研究金属塑性变形过程时发现光滑试样表面出现“滑移带”现象,随之滑移线理论被提出,并逐步形成的一种图形绘制与数值计算相结合的求解平面塑性流动问题的理论方法。滑移线的物理概念是:在塑性变形区内,剪切应力等于抗剪强度的屈服轨迹线。达到塑性流动的区域,滑移线处处密集,称为滑移线场。滑移线理论应用于土力学起于20世纪50年代,并成功应用于研究土体稳定问题,例如地基承载力、土坡稳定、土压力等。

有限单元法(FEM)的理论基础是最小势能原理。有限单元法将计算的连续体对象离散化,成为由若干较小的单元组成的连续体,称为有限元。被离散的相邻单元彼此连接,保持原先的连续性质,单元边线的交点称为节点,一般情况以节点位移为未知量。有限单元法将有限个单元逐个分析处理,每个单元满足平衡方程、本构方程和几何方程,形成单元的几何矩阵、应力矩阵和刚度矩阵。然后根据位移模式、单元边线和节点处位移协调条件组合成整体刚度矩阵。再考虑初始条件、边界条件、荷载条件等进行求解。求得节点位移后,逐个地计算单元应变、应力,最终得到整个计算对象的位移场、应变场和应力场。有限元法将计算对象视为连续体,该连续体可以是岩土材料,也可以是某些结构材料,以节点位移为未知量;此外,流体(例如水)流过岩土体,可将流体视为连续体,而以流体势(例如总水头)为未知量。有限单元法中的所谓“连续体”概念,是指进行单元离散化时,不允许任何相邻单元重叠或出现“无单元空隙”,即必须保证相邻单元彼此连接,存在单元编号,并具有确定的物理力学性质的模型参数。如若是“不连续”岩体,每个岩块之间本来就存在节理、裂隙等,当应用有限单元法时,这些节理、裂隙必须作为某类单元,即计算对象仍然是连续体。该类单元(例如接触面单元、节理单元等)的设置或处理可参阅有关文献。

离散单元法(DEM)用于非连续性岩体有其独特优势。岩体中每个岩块之间存在节理、裂隙等,使得整个岩体成为不完全连续体。离散单元法的基本原理是基于牛顿第二定律。离散单元法假设被节理裂隙切割的岩块是刚体,岩石块体按照整个岩体的节理裂隙互相镶嵌排列,在空间每个岩块有自己的位置并处于平衡状态。当外力或位移约束条件发生变化,块体在自重和外力作用下将产生位移(移动和转动),则块体的空间位置就发生变化,又导致相邻块体受力和位置的变化,甚至块体互相重叠。随着外力或约束条件的变化或时间的延续,有更多的块体发生位

置的变化和互相重叠,从而模拟各个块体的移动和转动,可直至岩体破坏。离散元法在边坡、危岩和矿井稳定等岩石力学问题中得到了广泛应用。此外,颗粒离散元还被广泛地应用于研究复杂物理场作用下粉体的动力学行为和多相混合材料介质或具有复杂结构材料的力学特性,如粉末加工、研磨技术、混合搅拌等工业加工领域和粮食等颗粒离散体的仓储和运输等实际生产领域。

非连续变形分析法,又称块体理论(DDA),其主要优势是适合于求解具有节理面或断层等不连续面的非连续性岩体的大变形问题,它是在不连续体位移分析法的基础上推广而来的一种正分析方法,它可以从块体结构的几何参数、力学参数、外荷载约束情况计算出块体的位移、变形、应力、应变以及块体间离合情况。非连续变形分析法视岩块为简单变形体,既有刚体运动也有常应变,无需保持节点处力的平衡与变形协调,可以在一定的约束下只单独满足每个块体的平衡并有自己的位移和变形。DDA法可求得块体系统最终达到平衡时的应力场及位移场等情况以及运动过程中各块体的相对位置及接触关系;可以模拟岩石块体之间在界面上的运动,包括移动、转动、张开、闭合等全部过程,据此可以判定岩体的破坏程度、破坏范围,从而对岩体的整体和局部的稳定性作出正确的评价。非连续变形分析法(DDA法)在隧洞和矿井稳定等岩石力学问题中已得到广泛应用。

非连续变形分析法与有限元和离散元有明显的异同点,在学习相关章节时须予以注意。

近年来,计算技术、测试技术都有了快速的发展。发展完善数值分析方法的同时,运用多种手段提高计算精度已成为工程技术人员的追求。运用比较符合工程实际的计算模型和参数是取得数值分析合理结果的重要影响因素之一。取得计算参数的方法有三种途径。一是室内模拟实验,建立相应的模型并确定参数;二是原位实验或现场观测,建立相应的模型并确定相关参数;三是应用易于得到的现场观测数据例如位移,选用适当的模型通过数值分析方法反演该模型参数,称为反演分析或反分析法。有多种反分析方法,例如逆反分析、正反分析、随机反分析、模糊反分析等。近年来人工神经网络算法、遗传算法等也相继应用于参数反分析研究。

岩土工程问题本身是一个高度复杂的不确定和不确知系统,其物性参数、本构模型、边界条件等通常无法准确确定。而从量测信息(位移、应力、温度等)出发,用反分析的方法来确定模型参数的反分析方法得到了迅速的发展,目前已成为解决复杂岩土力学问题的重要方法,在岩石坝基、高速公路路基、基坑、高边坡、地下洞室围岩和支护等诸多领域都有广泛应用。

反分析法越是广泛应用和发展,就越要强调实验研究(包括现场观测)的作用和地位。实验结果一方面能够提供数值分析所需要的参数或部分参数,另一方面又能够检验和评价各种解答的可行性、精度。理论分析、室内外测试和工程实践是

岩土工程分析三个重要的方面。实验与实测是进一步完善理论的重要依据,能够推动本构模型理论的发展和研究的深入。实验与实测研究地位不可替代,特别是对于某些重要工程和特别工程环境。根据原位测试和现场监测得到岩土工程施工过程中的各种信息进行反分析,根据反分析结果修正设计、指导施工。

当前,岩土工程常用的数值分析软件(程序)已有很多,许多单位有自己成熟的计算程序,例如河海大学的 TDAD 三维有限元程序,BCF 三维和二维固结有限元程序,SLP 土坡稳定分析程序,WWCC 土石坝静动力分析程序等。此外,适于岩土力学问题的商业软件也得到广泛运用,例如显式有限差分方法的拉格朗日法 FLAC3D,基于非线性有限元的通用分析软件的 ABAQUS,基于离散元方法的 PFC、UDEC 等等,本书最后几章将分别介绍 FLAC3D、ABAQUS、PFC 这三个商业软件的应用方法。

第四节 学习与应用岩土数值分析方法应注意的问题

岩土工程是一门应用科学,在岩土工程分析时不仅需要运用综合理论知识、室内外测试成果、还需要应用工程师的经验,才能获得满意的结果。岩土工程数值分析更讲究应用,要求学生能够掌握每种方法的基本理论,弄清其来龙去脉以及各自特点和适用范围,熟练应用其中一两种方法,能够熟练使用相关软件或自编程序,当然加强实践和总结体会(哪怕是间接的)必不可少。

针对某具体工程问题,能否得到计算结果取决于计算方法的选择和正确实施,包括程序的正确实现;而能否得到合理的结果则取决于计算模型及其参数的选择,以及边界条件、初始条件、相互作用、耦合问题等的正确模拟,这常常是问题的核心。所谓正确模拟,首先必须定性正确,其次才能谈得上量化准确。因此,学习和应用数值分析方法时必须把握好如下几个方面的关键问题:

- (1) 弄清每种方法的数学力学原理,掌握基本假定和适用范围;
- (2) 弄清每种方法对岩土体材料模型及其参数的要求;
- (3) 弄清每种方法对岩土体材料与结构的相互作用模型及其参数的要求,包括岩石块体之间的关联和相互作用模型与参数;
- (4) 分析初始条件、边界条件和荷载特征等,确定合理的模拟思路;
- (5) 分析岩土体是否存在渗流和与水的相互作用或其他耦合问题;
- (6) 对于反演分析,要研究和分析已知数据,明确待求未知量,选择恰当方法。

运用任一种数值分析方法,都必须先分析拟解决问题的关键所在,具体应用某岩土数值分析方法时应注意并厘清如下几个主要环节:

- (1) 研究分析对象,明确计算目的和拟解决的关键问题,选择数值方法,确定

建模方案;

- (2) 确定运用的本构模型,合理选择参数;
- (3) 确定边界条件与初始条件;
- (4) 模拟荷载及荷载的动态变化;
- (5) 确定计算的收敛评判依据;
- (6) 考察各环节简化的合理性,考题,否则应调整建模,并审查有关计算模型

与参数;

- (7) 确定后处理方法及成果整理的内容与分析方案。

应该指出,虽然岩土工程数值分析在多数情况下只能给出定性分析结果,但只要模型正确、参数合理,就能得到有价值的量化结果。岩土工程数值分析对工程决策有重要意义,是解决岩土工程问题一个重要的研究手段。岩土工程数值分析方法和应用范围很广且将不断扩大。

参考文献

- [1] 刘汉东,张勇,贾金禄. 岩土工程数值计算方法[M]. 郑州:黄河水利出版社,1995. 12.
- [2] (美)C. S. 德赛, J. T. 克里斯琴. 岩土工程数值方法[M]. 卢世深,潘善德,王钟琦等译. 北京:中国建筑工业出版社,1981. 8.
- [3] 中国力学学会计算力学委员会. 第一届全国计算岩土力学研讨会论文集[M]. 成都:西南交通大学出版社,1987. 11.
- [4] 龚晓南. 土工计算机分析[M]. 北京:中国建筑工业出版社,2000. 10.
- [5] 廖红建,王铁行. 岩土工程数值分析[M]. 北京:机械工业出版社,2006. 2.
- [6] 钱家欢等. 土工原理与计算(第1版,下册)[M]. 北京:水利水电出版社,1987.
- [7] 刘凯欣,高凌天. 离散元法研究的评述[J]. 力学进展,2003,33(25):483-490.
- [8] Strack O D L, Cundall P A. The distinct element method as a tool for research in granular media, Part I. Report to the National Science Foundation[M]. Minnesota: University of Minnesota,1978.
- [9] Cundall P A, Strack O D L. The distinct element method as a tool for research in granular media, Part II. Report to the National Science Foundation[M]. Minnesota: University of Minnesota,1979.
- [10] Cundall P A, Strack O D L. A discrete numerical model for granular assemblies[J]. Geotechnique, 1979,29(1):47-65.
- [11] Walton O R. Particle dynamics modeling of geological materials[J]. 1980, Lawrence Livermore National Lab. Report UCRL 52915.
- [12] 王泳嘉,邢纪波. 离散单元法及其在岩土力学中的应用[M]. 沈阳:东北工学院出版

社,1991.

- [13] 郑颖人,赵尚毅.岩土工程极限分析有限元法及其应用[J].土木工程学报,2005,38(1): 91-99.
- [14] 郑颖人,赵尚毅,孔位学,邓楚键.岩土工程极限分析有限元法[J].岩土力学,2005,26(1): 163-168.
- [15] 郑颖人,沈珠江,龚晓南.岩土塑性力学原理[M].北京:中国建筑工业出版社,2002.
- [16] 龚晓南.对岩土工程数值分析的几点思考[J].岩土力学,2011,32(2):321-325.
- [17] 濮家骝等.沈珠江土力学论文选集[C].北京:清华大学出版社,2005.