

YANTUGONGCHENG SHUZHJ JISUAN FANGFA

岩土工程

数值计算方法

刘汉东 姜 彤 刘海宁 杨继红 编著



黄河水利出版社

岩土工程数值计算方法

刘汉东 姜 彤 刘海宁 杨继红 编著

黄河水利出版社

· 郑州 ·

内 容 提 要

本书主要包括四部分内容:岩土体的本构模型;岩土工程中常用的数值计算方法,主要介绍了有限差分法、有限单元法、边界单元法与离散单元法的概念与基本原理;岩土工程数值计算方法在边坡工程、地下工程和建筑基础工程中的应用;常用的 GeoStudio、ANSYS 和 FLAC3D 等岩土工程软件的应用方法和一些工程实例。

本书可作为地质工程、岩土工程、水利工程、土木工程等专业的本科生和研究生的教材或课外阅读材料,也可供从事相关专业的工程技术人员、管理人员和教师参考使用。

图书在版编目(CIP)数据

岩土工程数值计算方法/刘汉东等编著. —郑州:
黄河水利出版社,2011. 10
ISBN 978 - 7 - 80734 - 900 - 6

I. ①岩… II. ①刘… III. ①岩土工程 - 数值计算 -
计算方法 - 高等学校 - 教材 IV. ①TU4

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2010)第 181108 号

出 版 社:黄河水利出版社

地址:河南省郑州市顺河路黄委会综合楼 14 层

邮政编码:450003

发行单位:黄河水利出版社

发行部电话:0371 - 66026940、66020550、66028024、66022620(传真)

E-mail:hhslebs@126.com

承印单位:河南省瑞光印务股份有限公司

开本:787 mm × 1 092 mm 1/16

印张:15.75

字数:365 千字

印数:1—2 000

版次:2011 年 10 月第 1 版

印次:2011 年 10 月第 1 次印刷

定价:35.00 元

前 言

岩土工程数值计算方法随着计算机的普及而得到了工程界的广泛重视,已成为岩土工程分析、设计和监测中的强有力的计算工具。

本书是根据笔者多年来的教学和科研实践,在编写《工程地质数值法》和《岩土工程数值计算方法》的基础上扩充改编而成的,原教材在华北水利水电学院水文地质与工程地质专业本科生中先后用过 24 届。这次改编加入了笔者近年来的科研成果和大量反映目前国际先进水平的新内容。书中把岩土工程数值计算方法的基本原理、程序设计、本构关系和工程实际结合在一起,力图做到深入浅出、循序渐进、理论与实践操作相结合,达到学以致用目的。

本书是在完成工程地质、岩石力学、土力学、基础工程学和弹塑性理论后的教程。全书共分十二章:第一章叙述了岩土工程与计算机科学、数学和力学的相关关系以及岩土工程数值计算方法基本原理,第二章详细介绍了岩土体的本构模型,第三章介绍了有限差分法,第四章介绍了有限单元法,第五章介绍了边界单元法、离散单元法、非连续变形分析及数值流形方法等其他数值计算方法,第六章、第七章和第八章介绍了岩土工程数值计算方法在边坡稳定分析、地下工程、建筑基础工程中的应用,第九章介绍了渗流理论及其在岩土工程中的应用,第十章、第十一章和第十二章介绍了 GeoStudio、ANSYS 和 FLAC3D 等几个常用的岩土工程软件的应用方法和一些工程实例。

参加本书编著的有华北水利水电学院的刘汉东(第一章和第三章)、姜彤(第二章和第四章)、刘海宁(第六章、第九章和第十章)、杨继红(第七章、第八章和第十二章)、王忠福(第五章和第十一章)。全书由刘汉东教授审查并负责统稿。

由于作者水平有限,不当之处在所难免,恳请广大读者批评指正。

编著者

2010 年 6 月

目 录

前 言

第一章 绪 论	(1)
第一节 岩土工程数值计算常用方法及软件	(2)
第二节 岩土工程数值计算方法的发展趋势	(3)
第三节 岩土工程与现代数学力学的关系	(5)
第四节 岩土工程数值法分析原理与应注意的问题	(6)
第二章 岩土体的本构模型	(13)
第一节 岩土体本构模型分类	(13)
第二节 线弹性模型	(15)
第三节 变弹性常数模型	(18)
第四节 弹塑性模型	(22)
第五节 不连续岩体模型	(27)
第三章 有限差分法	(31)
第一节 概 述	(31)
第二节 基本概念	(31)
第三节 有限差分公式	(32)
第四节 有限差分格式	(34)
第五节 边界条件	(37)
第四章 有限单元法	(38)
第一节 有限单元法的基本原理	(38)
第二节 节理单元	(44)
第三节 非线性问题的有限单元法求解	(48)
第四节 随机有限元分析	(52)
第五节 有限元的反分析	(61)
第五章 其他数值计算方法	(64)
第一节 概 述	(64)
第二节 边界单元法	(64)
第三节 离散单元法	(72)
第四节 非连续变形分析	(79)
第五节 数值流形方法	(81)
第六章 边坡稳定分析	(89)
第一节 概 述	(89)

第二节	边坡分类与破坏类型	(90)
第三节	影响边坡稳定的因素	(91)
第四节	边坡稳定分析的刚体极限平衡法	(92)
第五节	边坡稳定分析方法	(103)
第七章	地下工程	(114)
第一节	地下洞室的类型	(114)
第二节	洞室位置的选择	(115)
第三节	影响洞室稳定性的主要因素	(117)
第四节	地下开挖三维稳定性分析软件 Unwedge	(118)
第五节	有限差分法在地下工程中的应用	(124)
第八章	建筑基础工程	(147)
第一节	地基承载力的理论计算方法及程序	(147)
第二节	单支点桩墙支护结构设计计算	(149)
第三节	复合地基承载特性数值分析	(152)
第九章	渗流	(158)
第一节	渗流计算方法简述	(158)
第二节	渗流基本概念	(162)
第三节	达西定律	(168)
第四节	渗流基本方程	(170)
第五节	非饱和渗流	(176)
第六节	渗透系数及渗透系数张量	(180)
第七节	裂隙介质渗流	(183)
第八节	岩溶管道介质渗流	(185)
第九节	渗透稳定性问题	(188)
第十章	GeoStudio 应用与实践	(192)
第一节	GeoStudio 软件介绍	(192)
第二节	SEEP 模块应用	(193)
第三节	SIGMA 模块应用	(196)
第四节	SLOPE 模块应用	(197)
第五节	QUAKE 模块应用	(198)
第十一章	ANSYS 应用与实践	(201)
第一节	ANSYS 软件介绍	(201)
第二节	ANSYS 应用实例	(203)
第三节	ANSYS 工程实例	(209)
第十二章	FLAC3D 应用与实践	(221)
第一节	显式有限差分法程序——FLAC	(221)
第二节	FLAC3D 实例	(235)
参考文献		(242)

第一章 绪 论

岩土工程(Geotechnical Engineering)是以工程地质学、土力学、岩石力学及基础工程学为理论基础,解决和处理建设过程中出现的所有与岩体和土体相关的工程技术问题,是一门综合性的技术科学。岩土工程包括岩土工程勘察、设计、施工和监测。它不仅要反映出工程地质条件,提出问题,而且要提出解决问题的方法。同时,岩土工程勘察与设计、施工紧密结合,服务于工程建设的全过程,直到工程建设成后的监测工作,做到认识自然和改造自然的统一、技术可靠与经济合理的统一、岩土条件与建设要求的统一。在水电、能源、交通、矿山、房屋、市政、国防等各种工程建设中,都具有十分重要的意义。由于岩土工程与复杂多变的自然条件密切联系,往往成为工程建设的难点,成为保证工程质量、缩短工程周期、降低工程造价、提高工程经济效益和社会效益的关键。

岩土工程的研究对象是岩土体。岩土体是在地壳外力长期作用下形成的一种复杂的地质体。它在其赋存环境的影响下,是一种具有十分复杂力学性质的介质。由于地质体中展布着不同产状、不同力学性质的各种节理、断层、软弱夹层等结构面,在多次构造运动作用下,地质体内存在着初始应力场,从而表现在力学性质上具有弹性、非线性、弹塑性、黏性、流变性等。

岩土工程数值计算方法是应用工程地质学、岩土力学、基础工程学及数学、力学及计算机科学中的理论和方法研究岩土工程问题的。它包括岩土工程解析法和数值分析法。解析法只能求解介质力学性质、边界几何形状及作用荷载等较简单的问题,当介质为非线性、非均质、各向异性或者边界几何形状与荷载较复杂时,用解析法往往困难很大,甚至无能为力,这种情况下只能用数值分析法。20 世纪 60 年代以来,随着计算机科学的发展,数值分析法发展很快,目前已有很多理论和方法,本书主要介绍了有限差分法(FDM)、有限单元法(FEM)、边界单元法(BEM)、离散单元法(DEM)、拉格朗日元法(FLAC)理论、程序及在岩土工程中的基础、边坡、洞室等方面的应用,见图 1-1。

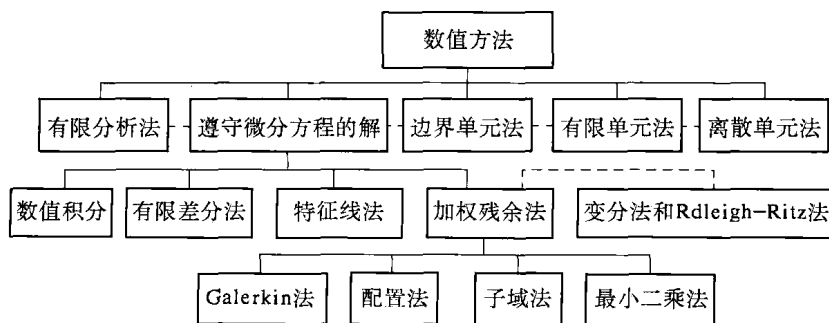


图 1-1 数值分析方法

第一节 岩土工程数值计算常用方法及软件

随着计算机技术的发展,数值分析方法在岩土工程的领域发展越来越快,从 20 世纪 40 年代开始,有限差分法(FDM)率先在岩土工程分析中得到应用,先是应用于渗流和固结问题的求解,后来推广应用于弹性地基梁和板以及桩基的求解。60 年代后,有限单元法(FEM)成为岩土工程数值计算的主要手段之一,由于它能较容易地处理分析领域的复杂形状及边界条件、材料的物理非线性和几何非线性性状,所以其应用发展很快,现已广泛应用于岩土工程的渗流、固结、稳定和变形等问题的研究及深基础、浅基础、桩基础、挡土墙、堤坝、边坡、基坑和隧道等各类岩土工程问题的分析。随着理论研究的深入,目前有限单元法不仅能解决常规静力分析,而且在动力分析、抗震分析及可靠性分析中也得到了广泛使用。

有限单元法(FEM)是建立在连续介质力学基础上的数值分析方法。在岩土工程分析中有时会遇到节理、层理及断层面等不连续问题,而且不少岩土材料在破坏前会产生裂缝、破裂带,呈不连续状态。为了能够处理非连续介质问题,发展了离散单元法(DEM)和非连续变形分析(DDA)。近年来还发展了流形元法(MEM),它建立在“流形”有限覆盖技术上,可统一处理连续和过渡到非连续问题。

为了减少计算工作量,将解析法和数值解法相结合发展了许多半解析法。有限层法、有限条法、有限元线法和边界元法均可认为是半解析法。采用半解析法可以达到降低维数、增加精度、加速运算和降低成本的效果。

在岩土工程问题中有时还会遇到大应变问题,拉格朗日元法(FLAC)是为处理连续介质非线性大变形问题而设计的。

近年来,计算机系统的迅速发展使计算成本日益降低,各种系统软件得到发展和应用,大大促进了数值计算方法在岩土工程中的应用。目前,常用的各种比较成熟而且应用较广的计算软件列于表 1-1。

表 1-1 常用岩土工程计算软件列表

方法	缩写	代表软件	网址
有限差分法 Finite Difference Method	FDM	WHI Visual Modflow GMS	www.ems-i.com
有限单元法 Finite Element Method	FEM	ANSYS + CivilFEM Adina System GeoSlope Sigma/W MIDAS/GTS	www.ansys.com.cn www.adina.com.cn www.geoslope.com www.midasuser.com
边界单元法 Boundary Element Method	BEM	Phase	www.roscience.com
离散单元法 Discrete Element Method	DEM	UDEC 3DEC	www.itascacg.com

续表 1-1

方法	缩写	代表软件	网址
流形元法 Manifold Element Method	MEM		
拉格朗日元法 Fast Lagrangina Analysis of Continua	FLAC	FLAC FLAC3D FLAC/Slope	www. itascaeg. com
非连续变形分析 Discontinuous Deformation Analysis	DDA		

第二节 岩土工程数值计算方法的发展趋势

近 40 年来,由于水电工程、采矿、交通和国防工程大规模展开,特别是电子计算机科学的迅速发展,使岩土工程的研究进入了一个新的阶段,而数值计算方法已成为解决难以用解析法表达的岩体工程问题的重要手段之一。当前,岩土工程数值计算方法正朝着图形化、智能化、专业化、不确定性、非线性的方向发展。

一、图形化与智能化

在计算机应用于工程的初级阶段,计算机在岩土工程中的应用也只是起到一个大型“计算器”的作用,但随着计算机的进步,数据库、专家系统、智能式计算机及 AutoCAD、GIS(Geographic Information System)等技术的发展,计算机在岩土工程中的应用也越来越活跃,它正在取代岩土工程师完成更多的工作,其中以数据库、专家系统及计算机编图发展最为迅速。岩土工程计算机应用的主要方向如图 1-2 所示。许多城市的工程地质数据库系统都已建成并逐步投入使用,各种专门的数据库,如隧道围岩分类的数据库、岩土体力学参数数据库、膨胀岩数据库等正在得到完善。各种新型实用的专家系统也开始在解决具体工程地质问题中发挥着一定作用,这方面的研究开发工作发展很快,可以预言,过不了几年很多岩土工程领域的问题都会出现相应的数据库及专家系统,并会逐步将多种分析、制图技术综合形成功能强大的岩土工程分析评价系统。

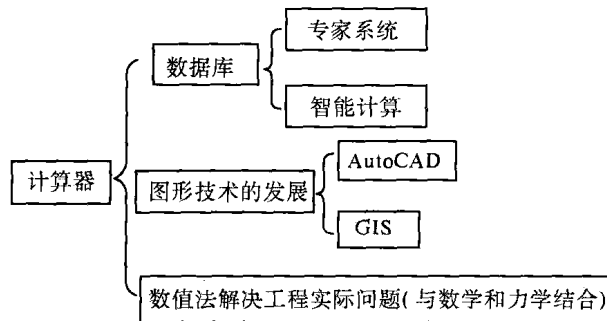


图 1-2 岩土工程计算机应用的主要方向

计算机制图在岩土工程中的应用在近年来得到了突飞猛进的发展,常规勘察的各种

图件基本上都可以由计算机完成,其中应用最多的是工程地质勘察剖面图。目前,岩土工程中的各种综合图、平面图、剖面图、立体图、等值线图等均已实现计算机化,大多数是使用 AutoCAD 来实现的,进一步的发展是在三维图形的开发及自动化程度方面。近几年新发展起来的 GIS 编图技术则更具有生命力,它将数据库、专家系统、制图技术综合到一起,使得各种复杂的工程地质图及相关信息得到充分利用,同时使土建更符合用户的需要并便于图件的储存、更新和复制。现在在灾害地质图、厂矿现状图、城市规划图、土地利用图等方面的初步应用可以预言,在不远的将来,GIS 将成为岩土工程制图的重要手段之一。

近年来,针对多数岩土工程数值计算软件遇到复杂地形时,前处理功能不强,地形简化导致计算模型仿真性不好的弱点,部分软件开发商已经实现了 GIS 与数值计算的有机结合,可直接导入 GIS 文件或 AutoCAD 文件,生成可用于计算的、地形逼真的三维计算模型。例如,MIDAS/GTS 软件中就提供了专门用于地形模型生成的 TGM(Terrain Geometry Maker)模型,可以将电子地图数据直接导入并实现有限元计算的网格剖分和模型建立。

二、通用化向专业化的转变

为了合理地进行岩土工程设计和施工,必须确切掌握岩土特性及其由于自重、外部荷载或边界条件变化而引起的岩体应力、变形及破坏的发展规律,对岩土体的稳定性作出正确的评价。大多数岩土介质均为非线性材料,其力学响应与金属、合金及聚合物的响应完全不同。这种差异主要是由于岩土介质宏观和微观结构及地应力、流体等因素所致,因而研究岩土工程问题应充分考虑其多相构造、率性相关、路径相关、时间效应、温度效应、渗流、胶结性质、节理裂隙、各向异性等特殊性质。

通过对岩土体本构关系、加固机理认识的不断深入和发展,岩土工程对数值计算提出了专业化的要求,为更真实地模拟岩土体在工程中的表现,数值计算方法完成了从通用化向专业化方向的转变,目前,不但出现了通用软件中的专业化极强的功能模块,如 ANSYS 中的 CivilFEM 模块,而且出现了专门用于某个专业或者用于某一类工程的专业计算软件,如 Plaxis 属于专门用于土力学有限元分析的软件,而 MIDAS/GTS 属于专为隧道工程计算而开发的软件。

三、不确定性与非线性分析方法

由于岩土介质的特殊性,在工程设计、施工、使用过程中具有种种影响工程安全、适用、耐久的不确定性,这些不确定性大致有以下几个方面。

(一) 岩土体参数的离散性、随机性

由于自然界中的岩土体是非均匀、非连续、各向异性的地质体,岩土体力学参数受矿物成分、结构构造、水等因素的控制,实际上是测不准的。所以,整个工程系统就具有了随机性、不确定性,它是在一定范围内变化的随机变量。在工程设计中采用确定性方法进行建筑物安全性能评估是不准确的。研究这类问题的方法有概率论、数理统计和随机过程。

(二) 安全系数的模糊性

在传统的工程设计方法中,安全系数是最为常用的评价建筑物或者工程结构安全的标准,它常被理解为材料的破坏强度对于使用中的最大应力之比,并简单地认为一个较高

的安全系数就能保证结构的安全。而在岩土工程中,把安全系数定为破坏应力与最大应力之比只适用于保持弹性状态直到破坏时为止的那种岩土体,因此通常所说的安全系数不能给出结构可靠度的直接信息,常规的安全系数的模糊性可能引导工程技术人员得到一个虚假的安全感,从而影响人们对工程结构安全的认识,导致工程事故的发生。

岩土工程数值计算结果的精确程度在很大程度上依赖于计算参数的选取,正是由于上述不确定性的存在,使得数值计算中参数的确定成为计算中最为关键的技术。近年来,可靠度分析方法成为一门正在迅速发展的新学科,被誉为近代工程技术的重要发展,无论是从国民经建设方面,还是从社会效益方面,可靠度研究都起到了非常重大的作用。自 20 世纪 70 年代初应用于岩土工程领域以来,由于国内外岩土力学界的重视,可靠度分析方法已经得到了长足发展,并成为岩土工程研究的重要发展方向。可靠性分析方法应用概率论与数理统计方法对输入计算模型的参数、边界条件、初始条件等进行处理,然后进行计算,得到结构的破坏概率与可靠度,可更为科学、真实地表现结构的安全性能。

目前,岩土工程数值计算中常用的可靠性分析方法有蒙特卡洛模拟法、一次二阶矩法、统计矩法及随机有限元方法。

随机有限元法是可靠指标法与数值法相耦合的方法,包括一次线性逼近法和迭代验算法。其实质是在常规有限元方法的基础上,改输入常数为随机变量,从而求得边坡总体的可靠指标和破坏概率。随机有限元方法集有限单元法和可靠性分析的优点于一身,适应性强,考虑问题全面,精度较高,可解决非线性问题。随着计算机技术和有限元法技术的提高,其工作量庞大和计算时间长的缺点基本已被克服,所以虽然发展历史不长,但随机有限元分析已经成为可靠度分析的一个重要方法之一。

在常用的岩土工程数值计算软件中都内置了可靠性分析计算模块,如 ANSYS 可直接开展随机有限元的计算,GeoStudio 软件可按正态分布输入计算参数,按蒙特卡洛随机抽样方法进行边坡刚体极限平衡和有限元模拟与分析。

第三节 岩土工程与现代数学力学的关系

目前,用于解决岩土工程实际问题的手段主要有以下三种。

一、地质定性分析法

地质定性分析法从工程地质条件和工程条件出发,凭借经验或采用类比的方法来解决工程问题,其缺点是无法定量解答。

二、解析法

解析法依靠数学公式进行推导,对于边界简单、介质单一的问题常常可以获得比较精确的计算结果,但由于目前对于岩土介质的理论还未进一步深入研究,在推导理论公式的过程中存在很多假设条件,所以计算结果往往只对理想状态下的岩土体有效,对工程缺乏实际意义。因此,该方法仅适用于求解介质力学性质、边界几何形状及作用荷载简单的工程问题。

三、数值计算方法

数值计算方法应用工程地质学、岩石力学、土力学、基础工程学及数学和计算机科学的理论和方法来研究岩土工程问题。目前提出了多种理论和方法,主要解决岩土工程中存在非线性、非均质各向异性、几何边界形状及作用荷载复杂的情况。该方法也是本书讨论的重点。

岩土工程工作可分为两个阶段,第一阶段是查明场地工程地质条件,在此基础上方可进行第二阶段的工作,即岩土工程定量化研究阶段,也就是稳定性评价。

岩土工程定量化研究包括的内容十分广泛,归纳起来,都可以看做是一个“稳定性”问题,即环境中各单元在内外力作用下的稳定状态及如何采取经济有效的措施,使之朝着系统稳定的方向发展。作为一个稳定性问题,就需要应用有关的数学、力学基础理论来进行工程地质定量计算。事实上,在工程地质诞生和发展过程中无时不在致力于把地质学理论与数学力学理论结合起来,解决实践中出现的各种地质工程问题。但岩土工程碰到的稳定性问题,又不同于一般的结构稳定问题,因岩土工程所研究的结构总是处于一定的地质环境之中,且地质体本身往往又是工程结构的一部分,这一特点就决定了在应用数学力学来解决实际工程问题时,不能照搬数学力学理论,应发展最适应岩土工程特点的计算方法,这就要求发展岩土工程数值计算方法。如基础沉降分析,上部结构与地基土层处于共同作用体系,地基土层是自然产物,上部结构是人类活动的结果。在沉降分析中,必须考虑土体与上部结构的协调变形作用,如果仅将上部结构当做一种外载加在地基土体之上进行计算分析,所得的结果将是不可靠的。

数学力学在岩土工程中的应用与数学力学方法本身的发展有关。早先,弹性力学、结构力学、材料力学、流体力学、概率统计等方法应用的较多,尤其是岩体力学和土力学理论的发展和完善,使工程地质定量计算得到了较快发展,这种状况也是与计算机的应用相一致的。因为大多数工程地质问题都是较为复杂的,仅靠数学力学中的解析方法难以达到目的,而依赖于计算机技术,以数学力学理论为基础的数值方法却使工程地质中的许多繁复计算成为可能,大大提高了计算精度,缩短了计算时间,因此数学力学理论是岩土工程定量分析计算的基础,也是岩土工程数值计算方法的理论基础。

第四节 岩土工程数值法分析原理与应注意的问题

一、主要内容及分析原理

数值计算方法的主要任务是完成岩土工程中的定量分析研究,包括对工程勘察中获得的基础地质资料进行合理的处理和分析。实质上就是地质因素定量描述,力学效应研究及勘测成果的处理,可简单地描述为如下几个方面。

(一) 地质因素及其力学效应定量化

地质因素及其力学效应定量化包括以下几个方面:

(1) 岩土体及地层特征信息定量化。

(2)岩体结构及其力学效应定量化。包括:①结构面地质规律及其力学效应;②结构体地质规律及其力学效应;③软弱夹层地质规律及其力学效应;④岩体结构地质规律及其力学效应。

(3)岩土体赋存环境因素定量化。包括:①地应力地质规律;②地下水地质规律;③地温地质规律。

(二)岩土体力学作用定量化

岩土体力学作用定量化包括以下几个方面:

- (1)岩土体力学作用规律定量化。
- (2)岩土体变形机制及本构规律。
- (3)岩土体破坏机制及其破坏判据。

(三)岩土体力学性质定量化

岩土体力学性质定量化包括以下几个方面:

- (1)岩块力学性质及岩体力学性质的结构效应。
- (2)土体力学性质及其结构效应。
- (3)环境因素对岩土体力学性质的影响。
- (4)岩土体力学性质形成规律。

(四)数学力学定量分析

数学力学定量分析包括以下几个方面:

- (1)数学地质方法。
- (2)数值模拟。
- (3)岩土力学方法。

在上述几个方面工作中,前三项是基础性工作,它为岩土工程问题的数学、力学分析提供合适的地质模型、力学模型及环境条件。没有这些基础工作,任何定量分析方法都只能是空中楼阁。因此,对具体工程问题的分析计算工作,应按图 1-3 所示的工作程序进行。

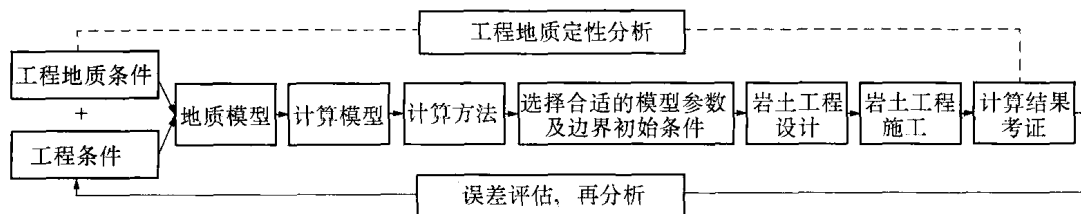


图 1-3 岩土工程数值分析法工作程序

从图 1-3 所示的分析过程可以看出,岩土工程数值分析工作不是简单的试验资料处理和经验性计算,而是一项工程、一个系统。首先必须对收集(岩土工程勘察)获得的地质信息进行加工处理,抽象为地质模型及相应的力学介质类型与力学模型。在此基础上,才能输入本构方程、破坏判据、工程活动方案、岩土体改造方案,给出数学力学模型,进行岩土工程计算分析和岩土工程设计。到此,岩土工程数值分析的任务还未完成,还需根据施工中的监测资料,预测验证未施工段的合理性,根据现场施工获得这些反馈信息进行第

二循环分析,有时还需要进行多次这种循环计算工作。

二、岩土工程数值分析应用中的几个问题

(一) 计算方法的适用性与连续性问题

岩土体属高度非线性复杂介质,由于构造运动或沉积风化造成的不连续结构面将岩体切割成无数细小的块体,其力学性质千变万化,而在研究工程地质问题的时候,常常根据多项假设条件采用连续介质力学来分析岩体力学问题,这就带来了数值计算中的适用性与连续性问题。

在岩土工程数值分析中,如果原封不动地引用基于连续介质假定的经典力学理论,会造成计算结果的误差,我们知道,连续介质的基本假定就是物体是连续的,从而其力学行为,如位移、应力、应变等都应该是连续变化的,而在自然界中,这样理想的物体是不存在的。因此,在进行数值分析之前,必须对岩土体的性质、结构和赋存环境进行分析,并按照工程地质原理和方法判定岩土体的本构关系和结构类型,考虑岩土体连续性假设的合理使用范围和各物理量的适用定义,从而完成地质模型向数学模型的转化。

常见的岩土体结构类型与数值分析方法对应关系如表 1-2 所示。

表 1-2 常见的岩土体结构类型与数值分析方法对应关系(何满潮等,2007)

序号	结构类型	工程地质力学模型	数值分析方法
1	完整结构	连续介质模型	有限单元法 有限差分法
2	块状结构	离散介质模型	离散单元法
3	层状结构	考虑不连续单元连续介质模型或 离散介质模型	有限差分法 有限单元法 离散单元法
4	碎裂结构	离散介质模型	离散单元法
5	散体结构	连续介质模型 离散介质模型	有限差分法 有限单元法 离散单元法

(二) 小变形理论与岩土体大变形问题

多数岩土力学理论认为岩土体的变形主要分为两个阶段,即弹性变形阶段和塑性(非线性弹性、流动)变形阶段。一般认为,在弹性阶段的变形较小,属于小变形,而进入非线性弹性、塑性、流动阶段的变形不再适用于常规数值计算采用的变形叠加理论,而应依据非线性大变形理论进行分析和计算。

目前,常用的岩土力学数值分析软件大多是基于连续介质小变形假定的,采用变形叠加原理进行分析和计算,因此得到的计算结果仅对弹性变形阶段适用。但我们应注意,非线性大变形是岩土介质变形的重要特征,用大变形理论进行计算和分析是十分必要的。

如果将小变形假定应用于岩土介质大变形的分析和计算,则其结果要么失真,要么迭代不收敛,根本无法得到计算结果。

(三) 计算方案一定要考虑岩土体的改造措施

处于天然地质环境中的岩土体,不需要经过改造而直接可为工程构筑物所利用的实在太少,一般要对岩土体进行改造,如支护、灌浆、锚固、桩基、夯实、抽排水等。这必然会扰动岩土体的特征,如果在分析方案中未计入这种扰动效应,那么计算结果会有较大误差,这是岩土工程数值分析不同于一般的数学力学计算的特色之一。

(四) 定性分析的控制作用

现已提出的许多计算方法,有些用一组公式来表示,有些用一个计算软件来实现。将这些计算方法用于解决实际工程问题时都会碰到一个问题,即适用条件,如果没有准确把握一种计算方法的适用条件,应用时将有可能得出错误的结论。这就需要定性分析进行指导,具体表现在,工程地质学家在对一个工程场地进行广泛调查研究的基础上,结合一些测试结果,对该场地的工程地质问题从机制上作出判断,然后选择合适的计算方法来证实某些结论或从量级上进行评价。其中定性判断尤其重要,如果这种判断是错误的,根据这种判断进行的计算结果也将不可靠。如对鲁布革水电站地下厂房边墙的变形分析,首先需要一种正确的判断,即变形机制是什么,是材料变形还是结构变形?若为材料变形,其又属于弹性、弹塑性、黏弹性或黏弹塑性变形,哪些变形为主要变形,计算时如何考虑。若为结构变形,应属于什么结构类型,采用什么结构模型?这种判断正确与否,将直接影响到计算结果的可靠性。从地质条件及支洞开挖后见到的变形特征,结合洞室几何尺寸,该厂房边墙围岩的变形主要是岩体结构变形引起的,因此采用板裂结构模型进行分析便能更加真实地揭示这种围岩的变形机制,正确地预测变形量。如果将其作为一种材料变形,采用连续介质模型,即使进行了大量的繁复计算,所得结论也难以符合实际情况。这只说明定性分析有一定的指导作用,对定量计算的其他方面,如边界条件、计算参数、误差估计等都具有控制作用。同时,说明定量计算只是一种工具,如何使用这些工具需要工程地质定性分析来指导。当然,定量计算结果又可反过来证实或修正定性分析,它们互相取长补短。这是岩土工程数值分析的第二特色。

(五) 考虑施工过程

岩土工程数值分析的第三大特色是从施工过程去进行计算分析。我们知道,岩土体是经过长期地质作用的产物,并处于一定的地质条件下,当取样进行测试分析时,岩土试样已脱离了它原有的环境状态,因此测试结果是否能真实地反映实际岩土体的受力历史过程,在分析时,计算者需要考虑这一因素的影响。同时,大多数工程地质问题都可看做一个开挖与堆积问题。在分析计算工程涉及岩土稳定时,计算方法需考虑这种开挖与堆积过程,以期正确地反映实际岩土体受力过程,使分析结果更趋合理。如地下洞室的稳定性分析,无论使用何种方法,恐怕都需要考虑不同开挖阶段及支护设置时间的影响。作为支护、围岩这一共同作用体系,围岩变形动态与开挖施工过程是相互影响的。常用两种方法来考虑开挖效应,一种是等效节点法,另一种是第二次弹性解(空单元)法,但计算结果有时会出现位移值偏离实际太大。刘钧等研究了这个问题,指出这两种方法在概念或理论上是不准确的,并给出了一种新的解法,即取边坡本身自重产生的位移场为零,而把

挖去部分自重作为边坡外荷载,其产生的不为零的位移作为边坡的初始位移场,而把开挖体和边坡自重共同作用产生应力场叠加作为初始应力场,在此前提下计算开挖的总位移和总应力。对某边坡工程,新旧计算方法得到坡面位移值见图 1-4。从图 1-4 中可以看出,新解法计算得到的位移矢量是指向采坑的,这与工程实际是符合的。而朝向天空的位移与边坡变形不一致。

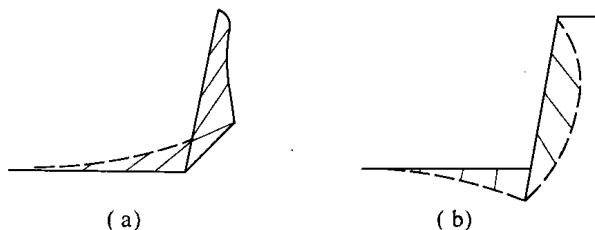


图 1-4 不同开挖计算方法所得边坡位移

(六) 计算模型的选取

上面已提到,计算模型选择的正确与否决定了计算结果的可靠与否。对具体工程问题的分析,必须以详细的地质调查为基础,以必要的测试资料为依据,提取合理正确的模型。

就工程建筑物所涉及的尺寸水平而言,土体介质被看做一种连续介质是普遍为工程界所接受的。但岩体的情况就不一样,大多数工程场地的岩体受节理裂隙纵横切割,在大的范围内还受断层破碎带控制,这就存在一个“连续”与“非连续”划分界线问题,不同的介质类型,不仅变形破坏机制不一样,而且计算原理也各不相同。对连续介质,计算方法相对来说是较为成熟的,而非线性介质问题的定量分析还不太令人满意。在实际问题分析中,如何把握这种界线是十分必要的。

严格来说,物质世界都不是连续的,它是由不同层次的“粒子”组成的,因此连续与否必须相对于一定的尺度水平,比如是宏观、细观还是微观水平。对岩体介质的划分来说,仅用一个宏观的尺度水平是不够的,它必须与工程建筑的规模相联系,也就是说,岩体中连续面的发育程度、规模与建筑物规模相联系。如图 1-5 所示,介质模型的选取为某工程实际节理统计后形成 Monte Carlo 网络图。当工程场地用 A 范围的单元来组合时,可以近似假定为连续介质,而用 B 区域的单元组合时,看做连续介质就显得牵强。这种不同尺度连续界线的划分受工程规模和节理裂隙发育程度所控制,同时不受介质的变形破坏机制的影响。一般来说,对于山体的评价,主要考虑 I、II 级结构面的不连续性,而对一般的洞室工程、坝基问题,III 级甚至 IV 级构造面均有可能引起不连续变形特征。

另外,需要强调的是,地质体的变形破坏与人工材料是截然不同的,主要表现在两个方面:其一是地质体内含有众多宏观不连续面,经过长期的地质作用,大多数都已遭受过破坏,工程地质定量计算都是定量评价地质体再变形、再破坏过程;其二是人工材料的受力历史基本上是一个加载过程(原为“自由”状态),而地质体则仍处于三向应力状态(“约束”状态)。工程建筑施工基本上是一个开挖卸载及解脱约束过程,因此岩土工程计算不能照搬固体力学的方法,它需要发展自己的方法来正确地描述地质体的特征。尤其是本构方程,前面已提及在考虑介质连续与否时要慎重,就是连

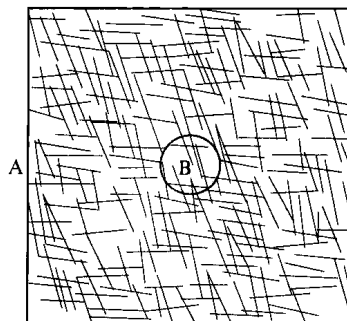


图 1-5 介质模型的选取

续介质模型,如非线性弹性、弹塑性、黏弹塑性、损伤等模型,尽管可以合理地描述绝大多数岩土介质的工程力学行为,但在建立这些模型时要依据介质的变形破坏机制(由定性分析获得)进行适当的修正。当将岩体的非弹性变形看做塑性或者黏塑性变形时,考虑到岩体具有孔隙、节理裂隙等不连续面,它的塑性变形主要是由于岩体微破裂的出现和裂隙错动的积累造成的,而岩体有塑性的体积变化,在受剪切时有剪胀现象,在引用屈服条件时要加上平均应力的因素,而在塑性变形规律方面要采用非正交流动法则,由于微破裂的发展,在进入塑性变形后产生卸载时,岩体的卸载模量比初始的弹模要小,出现弹塑性耦合的现象。其他诸如变形模量随应力的大小而变化、应变软化等特征都需要在计算模型中加以考虑,这样才能使计算结果符合实际。

(七) 计算参数

每一种计算方法除选择合适的计算模型及边界条件外,需要考虑的问题就是边界初始参数值的合理选取。从理论上讲,只有这些参数给定之后才有可能得到结果,且参数的准确与否直接影响到计算结果与实际的符合程度。现在的难度在于许多计算所需的参数在现场或实验室难以获得,有些时候是条件(现场条件、时间和经济)不允许。这一难度阻碍了定量计算在实际工程中的广泛应用。比如地应力这个参数,是所有计算方法都无法回避的环境参数,但现场获得这一参数确实不容易,除非是大型重点工程,一般不会花这笔费用。这就需要在勘测期间作出大致的判断或在计算方法上下工夫,有时还需要有些“艺术”(或技巧)处理。现在有些计算方法就是因为这个问题解决不好而未能在实际工程中应用。从目前的使用状况来看,应用最多的还是模型简单、参数较少的计算方法,如解析法、弹性边界元法、弹塑性有限单元法。

工程地质学家早就发现实验室取得的参数并不能真实地反映实际岩体的形态,而现场测试花费很大,且周期长,除非必须这么做,一般很难进行现场测试。位移反分析法的提出和发展为计算参数的确定提供了一条很好的途径。一般反分析的参数是地应力、变形模量、黏弹性常数。反分析方法很多,在实用上,其位移量测也非易事,因此还未得到广泛应用。另外,反分析方法本身也存在一个适当的修正,其中的定性判断是很重要的,如断层、节理面等的力学参数常由经验的方法确定。

在计算方法中,应尽量将本构方程及破坏判据改写成为常用力学数学的表达式,如弹塑性分析中的几种屈服判断,最好都直接用 c 、 φ 值来表达,各种非线性模型最好也能用线性参数来确定。只有这样,这种算法才能为工程界所接受,在实际工程中发挥作用。

(八) 精度、费用和前后处理

岩土工程数值分析中影响精度分析的主要因素有材料本构模型的合理程度和有限元计算的精度。前者是目前亟待解决但困难较大的问题,后者是需要数学力学工作进一步解决的问题。在计算分析中,合理选用本构模型和相应的模型参数,合理选用几何模型是提高分析精度的关键。对非线性分析,控制迭代所形成的误差也很重要。采用数值分析,如何评价分析精度是一个十分重要的问题,应给予充分重视。

将岩土工程定量计算用于解决实际问题时,需要解决精度和费用的矛盾。一般来说,计算方法考虑的影响因素越多,计算的精度相对要高些,但投资往往也需要较多。工程地质问题本身的特点决定了定量计算的各个环节都有许多不确定因素,在人为地使这些不