

高校土木工程专业规划教材

GAOXIAO TUMU GONGCHENG ZHUANYE GUIHUA JIAOCAI

实用岩土计算软件基础教程

石 崇 王如宾 主 编

SHIYONG YANTU JISUAN RUANJIAN
JICHU JIAOCHENG

中国建筑工业出版社

高校土木工程专业规划教材

实用岩土计算软件基础教程

石 崇 王如宾 主编

中国建筑工业出版社

图书在版编目 (CIP) 数据

实用岩土计算软件基础教程/石崇、王如宾主编. —北京: 中国建筑工业出版社, 2016. 6
高校土木工程专业规划教材
ISBN 978-7-112-19301-1

I. ①实… II. ①石… ②王… III. ①岩土工程-工程计算-应用软件-高等学校-教材 IV. ①TU723. 3-39

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2016) 第 064376 号

本书是河海大学岩土科学工程研究所的多位岩土专业的老师, 在多年的理论教学和相关专业学科实践的基础上编写而成。全书介绍了岩土软件及软件使用的基础知识, 包括: 绪论、岩土计算条件分析与确定、岩体地质信息统计分析软件 Dips 使用、岩土强度分析软件 RocPata 使用、二维边坡稳定分析软件 Slide 使用、表面楔形体稳定分析软件 Swedge 使用、地下隧洞楔形体稳定分析软件 Unwedge 使用、软岩隧洞支护评价分析软件 RocSupport 使用、弹塑性有限元分析软件 Phase2 使用、岩土工程分析三维有限差分软件 FLAC3D 使用、计算成果集成方法与常见撰写格式等内容。在每章内容之后, 还配有相关习题, 以便读者巩固所学的知识内容。

本书适合岩土工程专业的师 (生) 阅读使用。

* * *

责任编辑: 张伯熙

责任校对: 陈晶晶 刘梦然

高校土木工程专业规划教材 实用岩土计算软件基础教程 石 崇 王如宾 主编

*

中国建筑工业出版社出版、发行 (北京西郊百万庄)
各地新华书店、建筑书店经销
霸州市顺浩图文科技发展有限公司制版
北京市书林印刷有限公司印刷

*

开本: 787×1092 毫米 1/16 印张: 22 字数: 532 千字
2016 年 10 月第一版 2016 年 10 月第一次印刷

定价: 50.00 元

ISBN 978-7-112-19301-1
(28511)

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)

前 言

岩土工程是一门应用科学，涉及水电、土木、矿山、能源、交通、港航、国防等多种行业，研究对象涵盖边坡、隧洞、基础，具有工程类型多样、工程材料性质与所受荷载复杂、力学描述困难的特点，针对这些工程，实践中通常需要借助经验、半经验、数值方法进行设计与分析。

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。在计算机飞速发展的今天，熟练掌握岩土工程领域常用的计算软件，对岩土方向的本科生、研究生而言，既可增加岩土工程设计与分析经验，在专业知识学习时也有助于加深对工程问题的思考。

本书作者经过多年的岩土工程理论教学和科研实践，在岩土工程计算分析方面积累了一定的经验和应用技巧。为了达到让学生们零起点入门、快速掌握岩土工程计算分析的技能，精选了简明易懂的教学内容和大量的应用实例，以期学生能够在较短时间内具备运用合理计算方法分析问题和解决问题的能力。

从内容上看，本书适用于岩土工程、采矿工程、隧道地下工程等专业领域的本科生、硕士研究生初步了解岩土计算与分析。如果在了解本书基础上再涉猎更为深入的计算方法，往往能获得事半功倍的学习效果。

本书由河海大学岩土工程科学研究所石崇统稿，王如宾校核。其中第 1、2、5、9、10 章由石崇编写，第 3 章由李凯平编写，第 4 章由刘苏乐编写，第 6 章由白金州编写，第 7 章由沈俊良编写，第 8 章由金成编写，第 11 章由王如宾编写。

本教材由江苏高校品牌专业建设工程一期项目（PPZY2015B142），国家自然科学基金（51309089），江苏省自然科学基金（BK20130846），中央高校基本科研业务费专项资金（编号 2015B06014）资助。

本书是基于常用软件的帮助文件进行编写，限于篇幅进行了大量简化，由于知识结构、认识水平与工程实践条件的限制，难免出现理解错误与表达不当之处，恳请有关同行及读者批评指正，提出宝贵意见，以便及时修订、更正和完善。联系邮箱：303813500@qq.com。

目 录

第 1 章 绪论	1
1.1 岩土工程问题的基本特点	1
1.2 岩土工程分析方法与发展趋势	2
1.3 岩土计算分析的流程	5
1.4 岩土工程中常用的计算软件	6
1.5 岩土分析应注意的问题	11
第 2 章 岩土计算条件分析与确定	13
2.1 岩土计算条件分析	13
2.2 岩土几何模型的构建	18
2.3 利用 AUTOCAD 提取图元	26
2.4 网格模型构建	30
2.5 计算结果的前后处理	35
2.6 小结	49
第 3 章 岩体地质信息统计分析软件 Dips 使用	50
3.1 基本概况	50
3.2 创建 Dips 文件	68
3.3 倾倒、平面滑动、楔体滑动分析	75
3.4 小结	91
第 4 章 岩土强度分析软件 RocData 使用	93
4.1 基本概况	93
4.2 RocData 软件使用	95
4.3 软件操作流程	97
4.4 应用实例	118
4.5 RocData 使用小结	126
第 5 章 二维边坡稳定分析软件 Slide 使用	127
5.1 基本概况	127
5.2 软件操作流程	128
5.3 材料以及荷载施加	142
5.4 非圆弧滑面指南	152
5.5 复合滑面指南	157
5.6 水压力网格使用	160
5.7 支护措施分析	167
5.8 概率分析	171

5.9	利用 Slide 软件进行边坡稳定设计	174
第 6 章	表面楔形体稳定分析软件 Swedge 使用	176
6.1	软件介绍	176
6.2	软件操作流程	181
6.3	概率分析	188
6.4	支护分析	196
6.5	本章小结	201
第 7 章	地下隧洞楔形体稳定分析软件 Unwedge 使用	202
7.1	软件介绍	202
7.2	楔形体缩放	212
7.3	支护设计	217
7.4	应力场分析	226
7.5	本章小结	231
第 8 章	软岩隧洞支护评价分析软件 RocSupport 使用	232
8.1	软件理论基础与基本操作	232
8.2	中等支护实例	237
8.3	重型支护实例	246
8.4	支护需求初步估算附表	249
8.5	本章小结	250
第 9 章	弹塑性有限元分析软件 Phase2 使用	252
9.1	软件使用基本流程	252
9.2	复杂材料和荷载步设置实例	259
9.3	有限元地下水渗流分析实例	267
9.4	挡土墙分析实例	274
9.5	基坑分析实例	279
9.6	断层和衬砌相互作用分析实例	285
9.7	小结	293
第 10 章	岩土工程分析三维有限差分软件 FLAC3D 使用	294
10.1	FLAC3D 特点	294
10.2	FLAC3D 建模与模拟过程	297
10.3	边坡分析实例	321
10.4	隧洞分析实例	327
10.5	FLAC3D 使用总结	337
第 11 章	计算成果集成方法与常见撰写格式	339
11.1	科研报告、论文的基本格式	339
11.2	如何利用计算结果撰写报告或论文	342
11.3	计算软件学习应遵循的原则	343
参考文献		345

第1章 绪 论

1.1 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、岩石力学及基础工程学为理论基础,解决和处理所有与岩体和土体相关的工程技术问题的综合性技术学科。岩石材料是一种天然形成的地质体,在漫长的历史进程中因各种外力营造而转化为土,土又因沉积作用等变成岩体,岩-土不断发生转化。长期以来人们以岩土体作为建筑物地基、建筑材料以及工程结构的载体,因此可以说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,岩土工程包括了工程勘察、设计、施工和监测,不仅要根据工程地质条件提出问题,而且要得出解决问题的办法。

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。

(1) 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是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。这些行业的建造工程可能出现在各种地点,遇到不同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,例如开挖隧道、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。

对于不同地质条件和工程类型,在了解岩土体的基本性质和工程要求基础上,设计施工时原则上都必须同时考虑稳定或平衡问题;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。

(2) 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。可细分为坚硬的(硬岩),次硬岩的(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的、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。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。至今人们建立的岩土体本构模型不下百种。当然，建立能适用于各类岩土工程的理想本构模型是不可能的，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。

(3) 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。不同工程因其形式、使用要求不同，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、隧道开挖主要表现为应力卸载与解除、回弹等；土石坝施工时逐级加载以自重为主；而土石坝运行期则是以水压力和渗流为主；地震、爆炸则是突加动力荷载等。

(4) 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。

(5) 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。

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即坝体的相互作用；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。

1.2 岩土工程分析方法与发展趋势

岩土体作为地质体，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：

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在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。

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。

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）来寻求数值解。这是一个从定性到定量的过程。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提供了施展才华的舞台。

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分析方法，目前已存在多种岩土工程数值分析方法。

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。期望研究者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，学生既要掌握一些常用的数值方法，也需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。

滑移线理论是在经典塑性力学的基础上发展起来的。它假定土体为理想刚塑性体，强度包络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形这一事实，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）。滑移线的物理概念是：在塑性变形区内，剪切应力等于抗剪切强度的屈服轨迹线。达到塑性流动的区域，滑移线处处密集，称为滑移线场。

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。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。

离散单元法 (DEM) 应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,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 (平移和转动),块体的空间位置就发生变化,这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,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性质,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,它可以根据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,据此可以判断岩体的破坏程度、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) 在隧道和矿井稳定等岩石力学问题中已得到广泛应用。

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两种途径: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,其物理参数、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。因此须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,岩土工程计算方法正朝着图形化、智能化、专业化、不确定、非线性的方向飞速发展。

(1) 图形化与智能化

随着计算机技术的进步,数据库、专家系统、AutoCAD、智能式计算机、GIS等技术正逐步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。

(2) 通用化向专业化转变

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、胶结特性、节理裂隙、各向异性等特殊特性。

通过对岩土体本构关系、加固机理的认识,岩土工程数值计算出现了由通用化向专业化的转变。目前,不但出现了通用软件中专业化极强的功能模块,而且出现了某个专业或者用于某一类工程的专业计算软件。

(3) 不确定性与非线性分析方法

岩土介质在工程设计、施工和使用过程中具有种种影响工程安全、使用、耐久的不确定性。包括岩土力学参数的离散性与随机性、安全系数的模糊性等,由于岩土工程计算结果的精确性很大程度上依赖于计算参数的选取,使得数值计算中参数确定成为计算中最关键的技术。

在这种大背景下,可靠性分析方法正成为一门迅速发展的新学科,借助该方法可对输入模型的参数、边界条件、初始条件等进行处理,得到结构破坏概率和可靠度,相对真实的表现结构的可靠性能。常用的可靠性分析方法有蒙特卡洛模拟法、一次二阶矩法、统计矩法和随机有限元法等。

在常用的岩土计算软件中,很多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计算;Slide中可按不同分布输入参数分析边坡稳定性等。

1.3 岩土计算分析的流程

根据研究对象的大小,岩土工程的研究对象可分为三个尺度分析。

宏观尺度:工程尺寸几米~几百米,通常,研究工程一般都是宏观问题,比如某个边坡、基坑的稳定问题;

细观尺度:研究对象尺寸为毫米~米,比如边坡某局部块石与土颗粒相互作用对边坡稳定影响即为细观尺度;

微观尺度:研究对象以微米为单位,通常研究矿物构成及作用机理,需要借助显微设

备进行。

在宏观研究领域，岩土计算分析可定义为：在试验或者反演获取力学参数基础上，采用合理的本构模型，按照工程的约束（变形、应力）条件，进行施工（构建）过程的仿真，辅助以监测资料，对变形、稳定进行预测，指导下一步工程实践。

具体内容可包括如下：

- (1) 参数或者某一条件论证（力学参数反分析、地应力反分析）；
- (2) 强度分析（包括各种工况下的刚体极限平衡、极限平衡有限元、承载力等分析）；
- (3) 变形分析（包括静态变形、动态变形、长期变形等）；
- (4) 支护参数优化（包括开挖顺序、开挖方案、支护方案等论证）。

采用的方法有刚体极限平衡分析、连续数值模拟方法（有限单元法、有限差分法等）、非连续数值模拟方法（块体离散单元法、颗粒离散单元法、DDA 法等）。经过多年的发展，这些经验方法、半经验方法、数值模拟方法已经形成了相对完善的软件，供研究者与设计者使用。岩土工程设计分析步骤见图 1.3-1。

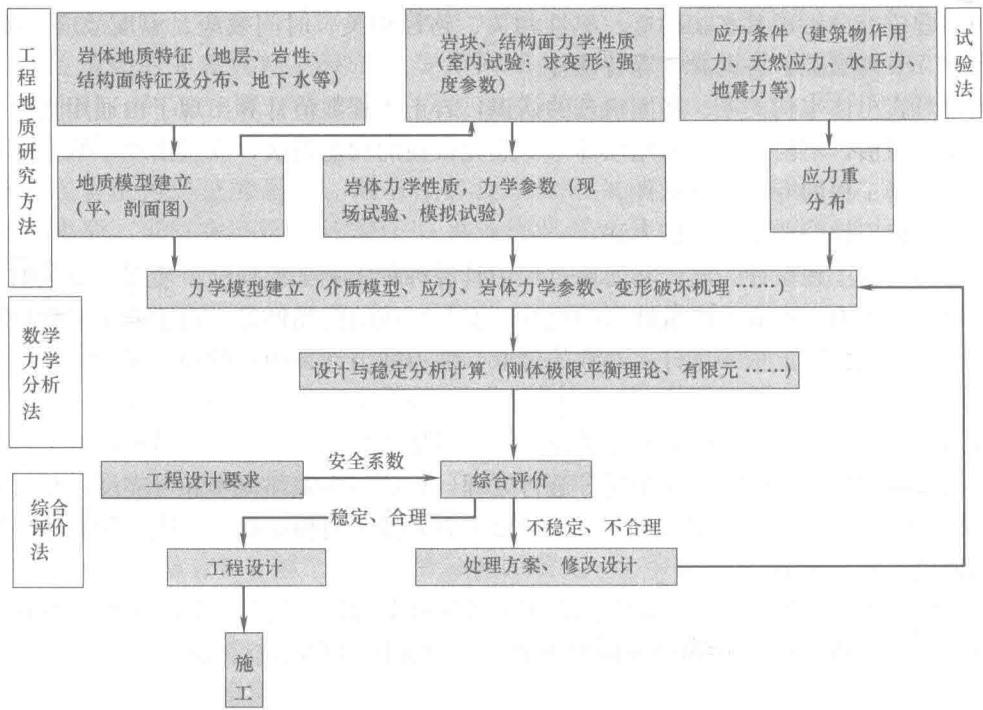


图 1.3-1 岩土工程设计分析步骤

1.4 岩土工程中常用的计算软件

与岩土工程有关的软件可分为两类，一类是与计算有关的前后处理工具；一类为计算软件。有些计算分析软件带有相应的前后处理功能。从方法上讲可分确定性分析方法（有

单元法、有限差分法、边界元法、离散元法、颗粒元法、不连续变形法、流形元法、无单元法、混合法等)和非确定性方法(模糊数学方法、概率论可靠度分析方法、灰色系统理论、人工智能与专家系统、神经网络法、时间序列分析法)等。

针对这些岩土工程常用的分析方法,目前已经形成大量的计算软件(经验、半经验计算软件、数值计算软件、前后处理辅助软件等)。常见软件种类介绍如下:

1.4.1 网格划分系列软件

岩土数值计算前处理一般需要具有自下而上、自上而下的建模功能,可以通过拉伸、旋转、镜像、缩放、偏置等操作得到面、体;可以直接构造矩形、多边形、圆、球、圆柱、圆锥、棱柱、圆环等;可以通过体、面的布尔加、减、交等操作得到复杂模型。这一类的软件有:

(1) Hypermesh

在 CAE 工程技术领域,Hypermesh 最著名的特点是它强大的有限元网格划分前处理功能。在处理几何模型和有限元网格的效率和质量方面,Hypermesh 具有很好的速度、适应性和可定制性,并且模型规模不受软件限制。采用 Hypermesh,其强大的几何处理能力可以很快地读取结构非常复杂,规模非常大的模型数据,大大提高了 CAE 分析工程师的工作效率,也使得很多应用其他前后处理软件很难或者不能解决的问题变得迎刃而解。

(2) GID

可将结果写成各种常用的图形文件如: BMP、GIF、TPEG、PNG、TGA、TIFF、VRML 等格式,以及 AVI、MEPG 等动画格式。后处理支持的结果显示方式有:带状云图显示、等直线显示、切片显示、矢量显示、变形显示等。并且可以根据需要定制显示菜单。

1.4.2 有限元计算系列软件

有限元分析软件目前最流行的为 ANSYS、ADINA、ABAQUS、MIDAS 等比较知名公司的产品,常用的软件有:

(1) ANSYS

ANSYS 是一款融结构、流体、电场、磁场、声场分析于一体的大型通用有限元分析软件。它能与多数 CAD 软件接口,实现数据的共享和交换,是现代产品设计中的高级 CAE 工具之一。具有流畅优化功能的 CFD 软件,融合前后处理与分析求解;有强大的非线性分析功能,快速求解器,可并行计算。

(2) ABAQUS

ABAQUS 是一套功能强大的工程模拟有限元软件,其解决问题的范围从相对简单的线性分析到许多复杂的非线性问题。达索并购 ABAQUS 后,将 SIMULIA 作为其分析产品的新品牌。是一个协同、开放、集成的多物理场仿真平台。

(3) Femap+NX Nastran

Femap+NX Nastran 基于 Windows 的特性为用户提供了强大的功能,且易学易用。其广泛地应用于多种工程产品系统及过程之中,如:卫星、航空器、重型起重机、高真空密封器等。软件提供了高级梁建模、中面提取、六面体网格划分、CAD 输入和简化工具等功能。

(4) COMSOL Multiphysics

COMSOL Multiphysics 是一款大型的高级数值仿真软件, 由 MATLAB 偏微分方程求解工具箱发展而成。其广泛应用于各个领域的科学研究以及工程计算, 被称为“最专业的多物理场全耦合分析软件”。COMSOL Multiphysics 可模拟科学和工程领域的各种物理过程, 以高效的计算性能和杰出的多场双向直接耦合分析能力实现了高度精确的数值仿真。

(5) FEPG

中国科学院数学与系统科学研究所梁国平研究员团队独创的有限元程序自动生成系统 (FEPG)。FEPG 采用元件化思想和有限元语言, 为各种领域、各方面问题的有限元求解提供了一个极其有力的工具, 可快速地完成编程劳动。FEPG 是目前“幸存”下来的为数不多的 CAE 技术中发展最好的有限元软件。作为通用型的有限元软件, 其能够解决固体力学、结构力学、流体力学、热传导、电磁场以及数学方面的有限元计算, 在耦合方面具有优势, 能够实现多物理场的任意耦合, 在有限元并行计算方面处于领先地位。

(6) MIDAS

1989 年由韩国浦项集团成立的 CAD/CAE 研发机构, 开始研发 MIDAS 软件, 目前在韩国结构软件市场中, MIDAS Family Program 的市场占有率排第一位, 在最满意的产品中也始终排在第一位。其主要模块如下:

建筑结构通用分析与设计系统: MIDAS/Gen; 桥梁工程通用分析及设计系统: MIDAS/Civil; 楼板与筏式基础分析与设计系统: MIDAS/SDS; 有限元网格划分与建模系统: MIDAS/FX+; 隧道工程通用分析及设计系统: MIDAS/GTS。

(7) Plaxis

Plaxis 由荷兰 Delft 技术大学研制, 其采用了高级的土体本构模型, 以模拟土体的非线性、时间相关性和各向异性; 采用了独特的方法计算静水孔隙压力和超静水孔隙压力, 因此可以用于分析非饱和土渗流问题; 常用于土-结构相互作用问题的分析, 程序界面友好。主要模块如下:

平面有限元分析程序 Plaxis; 三维隧道分析程序 Plaxis 3D-Tunnel; 三维基础工程分析程序 Plaxis 3D-Foundation; 动力分析模块 Plaxis Dynamic; 渗流模块 PlaxFlow。

Plaxis 在土方面的分析功能比较突出, 操作起来很方便, 学习门槛较低, 是一门难得的入门级土工有限元分析软件。

(8) GEO-SLOPE

GEO-SLOPE 由以下几个模块构成:

SLOPE/W: 边坡稳定性分析软件; SEEP/W: 地下渗流分析软件; SIGMA/W: 岩土工程应力应变分析软件; QUAKE/W: 地震应力应变分析软件。

TEMP/W: 温度场改变分析软件; CTRAN/W: 污染物扩散过程分析软件。

AIR/W: 空气流动分析软件; VADOSE/W: 专业的模拟环境变化、蒸发、地表水、渗流及地下水对某个区或对象的影响分析软件; Seep3D: 三维渗流分析软件。

1.4.3 Itasca 公司数值分析系列软件

Itasca 系列软件岩土工程专业软件, 包括 FLAC2D、FLAC3D、UDEC、3DEC、PFC2D、和 PFC3D, 这些程序的共同特点如下:

针对岩土体问题开发、但不限于岩土体问题；可以解决大变形、甚至几何形态破坏问题；可以追踪记录破坏过程、多种岩土本构、地质结构面模拟、真时间历程动力模拟、地下水模拟。内置外接程序语言满足特定要求。

FLAC2D/FLAC3D：岩土体工程高级连续介质力学分析的有限差分软件，建立在拉格朗日算法基础上，采用有限差分显示算法来获得模型全部运动方程的时间步长解，从而可以追踪材料的渐进破坏和垮落，特别适合模拟大变形和扭曲材料高度非线性（应变硬化/软化）/不可逆剪切破坏和压密、黏弹（蠕变）、孔隙介质的应力-渗流耦合、热-力耦合以及动力学问题等。

UDEC/3DEC：高级非连续力学分析软件，采用与 FLAC 一致的有限差分方法，力学上增加了对接触面的非连续力学行为的模拟，包括非连续介质（如节理岩体）沿离散滑面的滑移、裂隙张开、垮落等，因此普遍用来研究非连续面（地质结构面）占主导地位的岩土工程问题。

PFC2D/PFC3D：是利用显示差分算法和离散元理论开发形成的类岩土材料和粒状系统设计的 2D/3D 微观力学离散元分析软件。其来源于分子动力学，是从微观结构角度研究介质力学特性和行为的工具，它的基本构成为圆盘和圆球颗粒，然后利用边界墙（Wall）约束。计算时不需要给材料参数定义宏观本构关系和对应的参数，而是采用局部接触来反映宏观问题，因此只需要定义颗粒和黏结的几何和力学参数。PFC2D/3D 既可解决静态问题也可解决动态问题；既可用于参数预测，也可用于在原始资料详尽细致情况下的实际模拟，可以代替室内试验。

1.4.4 Rocscience 计算分析系列软件

Rocscience 系列软件的二维和三维分析主要应用在岩土工程和采矿工程领域，该软件使岩土工程师可以对岩质和土质的地表及地下结构进行快速、准确地分析，提高了工程的安全性并减少设计成本。Rocscience 系列软件在国内外岩土工程、矿山工程、水利水电工程、地质灾害评估、安全评价等领域得到了非常好的应用。

Rocscience 系列软件的使用在岩土工程分析和设计中都很方便，可以帮助工程师们得到快速、正确的解答。Rocscience 软件对于最新的项目都有高效的解算结果，软件操作界面是基于 WINDOWS 系统的交互式界面。Rocscience 软件自带了基于 CAD 的绘图操作界面，以随意输入多种格式的数据进行建模，可以快速定义模型的材料属性、边界条件等，并进行计算得到自己期望的结果。

目前为止，Rocscience 系列软件总共有多款专业软件模块，可将其分为三大类别：边坡稳定分析、开挖支护设计、岩土工具。

（1）二维边坡稳定分析软件-Slide

Slide 是一款应用二维极限平衡法分析土质边坡和岩质边坡稳定性的软件。它具备一系列全面广泛的分析特性。目前，Slide6.0 是唯一一款内置有限元分析稳态或瞬态条件下地下水渗流的边坡稳定分析软件。软件采用 Windows 交互界面，支持 CAD 底图建模，不论问题简单或复杂，都可轻松、直观地进行分析。

（2）地质数据的几何学和统计学分析软件-Dips

Dips 是用于描述节理和节理分布的统计分析软件，通过输入后的数据分析可以得出危险的节理面，并进行地质方位数据的交互式分析，用途广泛。它不仅适用于初学者，同

样适用于经验丰富的工程人员，为地质方位数据的分析提供强大的支持和帮助。

(3) 地下开挖三维楔体稳定性分析软件-Unwedge

Unwedge 是一款用于结构不连续及地下开挖所形成的三维楔体稳定性分析的交互式软件，用于分析岩体中存在不连续结构面的地下开挖问题。Unwedge 计算潜在不稳定楔体的安全系数，并可对支护系统对楔体稳定性的影响进行分析。Windows 的交互界面使得它易于分析和计算。

(4) 开挖和边坡有限元分析软件-Phase2D

Phase2D 是一款功能强大的弹塑性有限元分析软件，用于地下及地表的岩土体开挖支护设计分析。其对于开挖产生的应力、应变均可进行详细的计算及结果输出；给定安全系数后，Phase2D 可以对基坑开挖的支护系统进行优化从而降低支护成本；Phase2D 还可以直接采用有限元强度折减法进行边坡稳定分析。

(5) 软岩隧道支护评价软件-RocSupport

RocSupport 是一款适用于软弱岩层中圆形及近圆形隧道支护分析的交互式软件，可以直观地看到支护系统的作用。对于给定隧道半径、原岩应力、岩石参数和支护参数的软岩隧道，能够迅速计算围岩和支护作用曲线，由曲线的特征确定围岩支护系统的安全系数和失稳概率。

(6) 岩质边坡楔体稳定性分析软件-Swedge

Swedge 是一款分析和评价岩质边坡楔体的形状及稳定性系数及失稳概率软件，它具有快速、交互性以及操作简单等特点，并且楔体可以三维视图直观地展示出来。

(7) 岩土不连续强度分析软件-RocData

RocData 是一款分析岩土强度参数软件，它可以确定岩土强度包络线以及其他物理参数。RocData 还可以评估岩土材料参数，并形象地显示由于材料参数的改变而导致的破坏改变。RocData 与 RocLab 的结合并运用内置的岩土材料参数数据库可以提供更强大的分析能力。

(8) 三维地下岩体开挖边界元法分析软件-Examine3D

Examine3D 是一款基于边界元法计算地下岩体开挖的应力和位移的工程软件。它的数据可视化工具还被广泛地应用在三维矿山和土木工程领域，例如，可视化微震数据集（微震速度、源参数以及事件密度）。

(9) 三维固结沉降分析软件-Settle3D

Settle3D 是一款计算固结沉降的分析软件，它可以分析三维基础、大坝和地表开挖等复杂的土体模型和荷载工况引起的固结沉降；可以模拟分步、时间依赖的固结分析，包括主固结和次固结（蠕变）分析；还可以分阶段模拟地下水位变化，可以指定水平和竖向的排水条件对任意时间的三维应力和地下水进行评价。

(10) 岩质边坡倾倒分析和支护设计软件-RocTopple

RocTopple 是一款交互式工程软件工具，主要用来进行岩质边坡倾倒分析和支护设计。RocTopple 的主要理论依据为 Goodman 和 Bray 在 1976 年发表的“块体倾倒方法”。

(11) 陡峭岩质边坡落石统计分析软件-RocFall

RocFall 是一款统计陡峭岩质边坡落石和评价其安全性的软件，它可以计算落石的动能、速率、弹起高度以及落点位置。工程人员通过运用落石的动能确定反弹高度和轨迹来

确定保护系统的位置和保护措施。典型应用包括岩石掘进和露天边坡等。

(12) 岩质边坡平面滑动稳定分析软件 RocPlane

RocPlane 是一款岩质边坡平面滑动分析设计软件, 可以考虑地下水或地震荷载对边坡稳定性的影响。RocPlane 能够简单快速地建立平面模型并进行二维或三维展示, 内置丰富有用的工具可以用于快速地建立、修改以及运行模型。

1.5 岩土分析应注意的问题

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)也是必不可少的。

针对某具体问题, 能否得到计算结果取决于计算方法的选择和正确的实施, 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理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, 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。岩土工程数值分析方法和应用范围很广且将不断扩大。