



郑善喜 编著

核电岩土工程稳定分析控制及 理论方法

HEDIAN YANTU GONGCHENG WENDING FENXI KONGZHI
JI LILUN FANGFA

非
外
借

中国建筑工业出版社

核电岩土工程 稳定分析控制及理论方法

郑善喜 编著



中国水利水电出版社

图书在版编目 (CIP) 数据

核电岩土工程稳定分析控制及理论方法 / 郑善喜编著.

北京: 中国建筑工业出版社, 2017.7

ISBN 978-7-112-20724-4

I. ①核… II. ①郑… III. ①核电站-岩土工程-稳定分析-研究 IV. ①TM623

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2017) 第 087785 号

本书是作者近三十年工作经验总结和专业理论知识相结合的成果, 具有较深厚的专业理论知识和极强的可操作性。

全书共包括 9 章内容, 分别为: 岩土工程稳定分析理论方法进展; 岩土工程结构的本构模型; 岩土工程勘察中的地质力学分析; 岩土工程宏观细观力学参数确定方法; 岩土工程强度极限分析理论方法; 岩土工程变形监测数据分析方法; 岩土工程中的数值模拟方法; 岩土工程问题的反分析方法; 岩土工程控制与分析方法探讨。

本书适合核电岩土专业人员阅读使用, 也可作为广大岩土工程专业的师生的专业参考书。

责任编辑: 张伯熙

责任设计: 李志立

责任校对: 李欣慰 李美娜

核电岩土工程稳定分析控制及理论方法

郑善喜 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

廊坊市海涛印刷有限公司印刷

*

开本: 787×1092 毫米 1/16 印张: 13¼ 字数: 331 千字

2017 年 4 月第一版 2017 年 4 月第一次印刷

定价: 50.00 元

ISBN 978-7-112-20724-4

(30382)

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)

著者简介:

郑善喜,核工业湖州工程勘察院总工程师,教授级高级工程师,国家注册岩土工程师。1989年毕业于中国地质大学(武汉)工程地质专业,长期从事水文工程环境地质勘察、岩土工程勘察设计检测监测、地质灾害治理勘察设计监测领域的工程实践和科研工作,主持的浙北大厦一、二期工程地质勘察报告获得1996年度地质矿产部优秀工程勘察项目二等奖;“杭嘉湖平原1:5万生态环境地质调查试点”主要调查人及成果第二著者,获得国土资源部2003年科学技术二等奖;主持的“湖州国际花园住宅小区岩土工程勘察”项目获2005年浙江省建设工程钱江杯奖(勘察设计)二等奖;担任技术负责人的湖州东吴国际大厦及太湖明珠大酒店获得当时的核工业部级优秀勘察设计一等奖。主持设计的湖州温泉高尔夫边坡等大型、特大型工程设计,针对不同坡面特征的边坡采用了锚杆、抗滑桩、挡土墙、柔性款式格栅等多种支护措施使工程边坡的安全度得以保证,并用多样性的本土植物品种厚层基质喷播技术,达到了令各方满意的边坡绿化效果。参编的浙江省地方标准《工程建设岩土工程勘察规范》DBJ33/T 1065—2009填补了省内空白。在水工、岩土及地质灾害治理等方面发表学术论文10余篇。

前 言

在能源、土木、矿山、交通、港航、国防等多种行业中均会应用到岩土工程技术，岩土工程的研究对象涵盖边坡、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，还需要结合工程师的经验判断，才能获得满意的结果。在计算机技术飞速发展的今天，熟练掌握岩土工程领域常用的计算机软件，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。

本书作者具有 30 余年从事工程勘察、设计、施工的经验，经过多年的岩土工程浸润和科研实践，在岩土工程定性、定量分析方面积累了一定的经验和应用技巧。基于参与及合作过的一些课题项目，针对岩土工程的各类问题，精选了通俗易懂的内容和大量的使用实例，以期读者快速掌握岩土工程计算分析的技能，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。

本书由核工业湖州工程勘察院郑善喜统稿撰写。同时，感谢核工业湖州工程勘察院的领导和同事们，是他们的督促和帮助，促进了本书的最终成稿。另外河海大学的石崇、谈小龙等教授为本书的撰写提供了一些宝贵的原始资料及建议，在此表示诚挚的感谢。

由于作者知识结构、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并提出宝贵意见，以便及时修订、更正和完善。

目 录

第 1 章 岩土工程稳定分析理论方法进展	1
1.1 岩土工程结构的基本特点	1
1.2 岩土工程数值分析方法与发展趋势	2
1.3 岩土工程结构计算分析的流程	5
第 2 章 岩土工程结构的本构模型	7
2.1 岩土本构模型分类	7
2.2 线弹性模型	8
2.3 变弹性常数模型	11
2.4 弹塑性模型	15
2.5 不连续岩体模型	19
第 3 章 岩土工程勘察中的地质力学分析	23
3.1 岩土工程勘察中应关注的问题	23
3.2 核电岩土工程勘察的特殊要求	27
3.3 核电建设中的岩土工程问题	28
3.4 常用的地质力学分析方法	30
3.5 基于工程地质调查的三维建模	34
第 4 章 岩土工程宏细观力学参数确定方法	36
4.1 常规的岩土力学参数选取方法	36
4.2 土石混合介质力学试验获取方法	38
4.3 基于数字图像分析的介质识别方法	45
4.4 基于细观特征分析的土石混合体力学参数研究	57
4.5 基于裂隙网络分析的节理岩体参数研究	71
4.6 本章小结	82
第 5 章 岩土工程强度极限分析理论方法	83
5.1 点强度指标分析方法	83
5.2 刚体极限平衡分析方法	85
5.3 边坡稳定滑移线理论与特征线方法	89
5.4 基于 PSO 算法的边坡临界滑动面搜索方法	98
5.5 本章总结	105
第 6 章 岩土工程变形监测数据分析方法	106
6.1 监测信息的异常识别	106
6.2 基于变形监测的统计回归建模研究	119
6.3 残差时序的 ARMA 模型	119

6.4	工程实例分析	123
6.5	本章小结	127
第7章	岩土工程中的数值模拟方法	128
7.1	岩土工程中常见数值模拟方法	128
7.2	利用数值模拟研究吊脚桩基坑稳定性实例	130
7.3	利用数值模拟研究打桩过程对地下结构影响	143
7.4	利用离散元数值模拟方法评估滑坡灾害	161
7.5	本章小结	171
第8章	岩土工程问题的反分析方法	172
8.1	反分析方法的发展	172
8.2	反分析基本原理	174
8.3	变形参数反分析	183
8.4	基于滑坡征兆进行强度参数反分析	192
8.5	小结与讨论	197
第9章	岩土工程控制与分析方法探讨	198
9.1	常见岩土工程控制面临的问题	198
9.2	全生命周期岩土工程设计	200
9.3	理论联系实践的工程分析	201
	参考文献	204

第1章 岩土工程稳定分析理论方法进展

1.1 岩土工程结构的基本特点

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成土，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，而且要提出解决问题的办法。

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，能源、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、水利工程建设的特点。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。这些行业的建设工程可能出现在各种地点，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，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,而不是线性材料,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,并开展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。不同的工程因其形式、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;而水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,尽可能确切地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,二是土(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 岩土工程数值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,才能够求得精确解

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。由于数学和力学理论的发展，计算技术和计算机技术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，并且得到广泛应用，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。期望读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，要求读者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。

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）。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）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（移动和转动），则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，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，无须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做出正确的评价。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目标。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。反分析方法有多种：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定系统，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。因此一定要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而完成更多的工作，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、各向异性等特殊性质。

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各种影响工程安全、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 岩土工程结构计算分析的流程

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所述：

- (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。

岩土本构是岩土介质的应力、应变、应变率、加载速率、应力历史、应力水平、加载途径及温度等之间的函数关系。在工程结构数值计算中，岩土、结构材料的本构关系十分重要，数值计算和分析的精度在很大程度上取决于所采用材料本构模型的合理性。

一种数值模拟方法能否在岩土工程问题的分析中得到较多应用，在很大程度上取决于该计算方法能否采用多种本构模型进行计算。目前流行的岩土工程计算软件绝大多数具备了采用多种本构模型进行计算的能力，另外往往还根据需求，专门开发了一些本构模型的动态链接库（DLL），用于特殊岩土工程问题的分析与计算。

值得注意的是，没有必要将所有复杂力学性质及其影响完全反映到一个力学模型中进行研究，因为随着研究对象所处的环境与条件变化，可以采用不同的力学模型去模拟。如岩石处于脆性断裂状态，就可以忽略延性，而作为弹性体研究。

一种数值计算方法能否在岩土工程问题的分析中得到较多应用，在很大程度上取决于该计算方法能否采用多种本构模型进行计算。

第 2 章 岩土工程结构的本构模型

岩土本构是岩土介质的应力、应变、应变率、加载速率、应力历史、应力水平、加载途径及温度等之间的函数关系。在工程结构数值计算中，岩土、结构材料的本构关系十分重要，数值计算和分析的精度在很大程度上取决于所采用材料本构模型的合理性。

一种数值模拟方法能否在岩土工程问题的分析中得到较多应用，在很大程度上取决于该计算方法能否采用多种本构模型进行计算。目前流行的岩土工程计算软件绝大多数具备了采用多种本构模型进行计算的能力，另外根据需求，还专门开发了一些本构模型的动态链接库（DLL），用于特殊岩土工程问题的分析与计算。

值得注意的是，没有必要将所有复杂力学性质及其影响完全反映到一个力学模型中进行研究，因为随着研究对象所处的环境与条件变化，可以采用不同的力学模型去模拟。如岩石处于脆性断裂状态，就可以忽略延性，而作为弹性体研究。

一种数值计算方法能否在岩土工程问题的分析中得到较多应用，在很大程度上取决于该计算方法能否采用多种本构模型进行计算。

2.1 岩土本构模型分类

岩土体本构关系的研究目前已经取得了长足进步与发展，现今已有数百个本构模型用来描述各种不同岩土体的应力-应变形状。一般来说，建立一个好的本构模型应当考虑如下几点：

- (1) 数学公式推导方便。
- (2) 模型中主要参数有明确的物理意义。
- (3) 可用适当的试验方法确定模型中的各个系数。
- (4) 可从实验室里各种应力路径的试验中证实模型的合理性。

目前常见的岩土体本构模型种类有：

1) 线弹性模型类。其特征是加载、卸载时应力-应变关系呈直线形。满足该类条件的模型有虎克弹性模型（文克勒地基模型、弹性半无限体模型），横观各向同性体（沉积、固结分析）等。

2) 变弹性常数类。加载、卸载时应力-应变关系呈某种曲线形状，弹性常数随着应力水平不同而变化、卸载时或者按照加载路径恢复或者呈线弹性变化。满足该条件的岩土模型有双线性模型、双曲线模型、邓肯-张模型等。

3) 弹塑性模型类。当加载时应力低于某一值时，应力-应变关系则呈直线形，而一旦应力达到该值时，则呈某种曲线变化或保持水平直线。特点是加载后达到一定应力值才会出现塑性变形，小于该值时加载和卸载路径一致，塑性状态分为应变硬化、应变软化、理想塑性（图 2.1.1）等。满足该条件的模型有 Prandtl-Reuss 模型、Drucker-Prager 模型、

Mohr-Coulomb 模型、Hoek-Brown 模型、CambridgeClay 模型等，这是目前岩土工程各领域应用最广的一类模型。

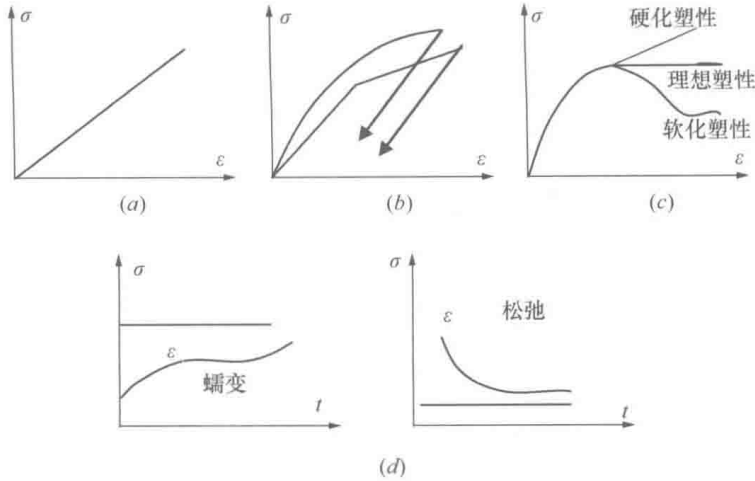


图 2.1.1 常见的应力应变曲线

(a) 线弹性模型；(b) 变弹性常数类；(c) 弹塑性模型类；(d) 黏弹性模型类

4) 黏弹（塑）性模型。该类模型在应力-应变关系中还包括时间因素。如果材料响应和载荷速率或变形速率无关，称材料为率无关，相反，与应变速率有关的塑性称为率相关塑性。当应力不变时，应变会随着时间增加而增加（蠕变）；当应变不变时，应力随着时间会减少（松弛）。常用的有 Maxwell 模型、Kelvin 模型、Bingham 模型、西元模型等。

5) 不连续岩体模型。针对不连续面、断层破碎带，采用专门的接触模型进行考虑。包括无拉应力模型、层间滑移模型、节理单元模型、软弱夹层模型等。

随着人们对岩土体本构关系认识的深入，一方面在理论上取得了重大进步，另一方面各本构在应用中的缺陷不断被修正，形成了更多的岩土体本构模型、理论。

一些新理论的提出也促进了岩土体本构关系理论研究的发展，如内蕴时间塑性理论（内时理论）不以屈服面的概念作为其理论发展的基本前提，也不把确定屈服面作为其计算的依据，而认为塑性和黏塑性材料内任一点的现时应力状态是该点领域内整个变形和温度历史的泛函数；损伤模型是基于损伤力学理论提出的，将材料损伤的几何描述和等价应力相结合，建立了本构方程和损伤演化方程。

事实上，各类模型之间并没有严格的界限，且新理论、新模型不断出现，对本构模型进行精确分类十分困难，也没有实际意义。重要的是，本构模型能够较好地反映工程岩土体的主要性状，从而通过计算分析获得工程建设所需精度的分析结果。因此以理论模型为基础建立适用于某一地区或某一类岩土工程问题的实用模型是未来岩土体本构模型研究的发展方向。

2.2 线弹性模型

线弹性模型是最简单也是最常用的一类模型，其基本理论是弹性力学中的广义虎克定律。虎克弹性模型及横观各向同性模型的基本方程及弹性参数公式如下。

1. 基本方程

按弹性力学理论，一维情况下的应力-应变关系可简单写为：

$$\epsilon = \frac{\sigma}{E} \tag{2.2.1}$$

式中， σ 为应力、 ϵ 为应变、 E 为弹性模量。推广到三维状态，可用矩阵表示：

$$\{\epsilon\} = [C]\{\sigma\} \text{ 或 } \{\sigma\} = [D]\{\epsilon\} \tag{2.2.2}$$

式中， $[D]$ 为弹性矩阵， $[C]$ 为柔度矩阵。

从弹性力学可知，最一般的 $[C]$ 矩阵中共有 36 个元素，以建立应力-应变线性关系，由于这种关系的对称性， $[C]$ 中的元素可以减少至 21 个。即

$$[C] = \begin{bmatrix} C_{11} & & & & & & \\ C_{21} & C_{22} & & & & & \\ C_{31} & C_{32} & C_{33} & & & & \\ C_{41} & C_{42} & C_{43} & C_{44} & & & \\ C_{51} & C_{52} & C_{53} & C_{54} & C_{55} & & \\ C_{61} & C_{62} & C_{63} & C_{64} & C_{65} & C_{66} & \end{bmatrix} \text{ 称} \tag{2.2.3}$$

根据岩土介质的特性可假定是各向同性或正交各向异性。各向同性材料常数最终可简化为 2 个，即 E 、 μ 。对于正交各向异性材料，如坐标轴 x 、 y 、 z 是其弹性主轴，这时剪应力不会引起正应变，式 (2.2.1) 中元素减少至 9 个，其中 C_{41} 、 C_{42} 、 C_{43} 、 C_{51} 、 C_{52} 、 C_{53} 、 C_{64} 、 C_{61} 、 C_{62} 、 C_{63} 、 C_{65} 为零元素。当 xy 平面是各向同性的弹性主轴时， z 轴方向是各向异性的弹性主轴，如图 2.2.1 所示，称为横观各向同性。成层岩体就属于这种类型，其他材料如木材、竹材垂直于纤维方向是各向同性的。正交各向异性的 $[C]$ 矩阵为：

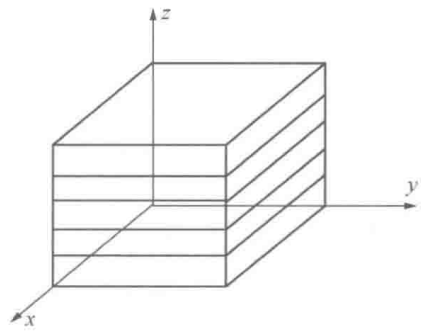


图 2.2.1 横观各向同性模型

$$[C] = \begin{bmatrix} C_{11} & & & & & & \\ C_{21} & C_{22} & & & & & \\ C_{31} & C_{32} & C_{33} & & & & \\ C_{41} & C_{42} & C_{43} & C_{44} & & & \\ C_{51} & C_{52} & C_{53} & C_{54} & C_{55} & & \\ C_{61} & C_{62} & C_{63} & C_{64} & C_{65} & C_{66} & \end{bmatrix} \text{ 称} \tag{2.2.4}$$

对于横观各向同性材料，由于 x 、 y 面是各向同性的，因此式 (2.2.4) 中 $C_{11} = C_{22}$ 、 $C_{31} = C_{32}$ 、 $C_{55} = C_{66}$ 、 $C_{44} = \frac{1}{2}(C_{11} - C_{12})$ ，独立常数减少到 5 个，即 C_{11} 、 C_{33} 、 C_{66} 、 C_{21} 、 C_{31} 。

2. 弹性常数的确定

虎克弹性模型的弹性模量 E 可从常规三轴压缩应力路径 (CTC) 试验曲线中得到，在该应力路径中

$$\tau_{\text{oct}} = \frac{\sqrt{2}}{3}(\sigma_1 - \sigma_3) \quad (2.2.5)$$

由于 σ_3 在试验中始终保持不变, 则

$$d\sigma_{\text{oct}} = \frac{\sqrt{2}}{3}d\sigma_1 \quad (2.2.6)$$

$$k = \frac{d\sigma_{\text{oct}}}{d\varepsilon_1} = \frac{\sqrt{2}d\sigma_1}{3d\varepsilon_1} = \frac{\sqrt{2}}{3}E \quad (2.2.7)$$

$$E = \frac{3}{\sqrt{2}}k \quad (2.2.8)$$

式中 k 为试验曲线的斜率, 一般取卸载时的值效果较好。

因此得到 $\tau_{\text{oct}}-\varepsilon_1$ 试验曲线斜率后可以根据式 (2.2.8) 求得 E 值, 体积模量 K 可以从静水压力路径 (HC) 试验曲线得到, 在 HC 试验中作 $\sigma_m-\varepsilon_y$ 曲线。由体积压缩模量的定义可知 K 是该曲线的斜率如式 (2.2.9) 所示

$$K = \frac{d\sigma_m}{d\varepsilon_y} \quad (2.2.9)$$

一般也取卸载时的值。同样, 可从双轴压缩试验 (TC) 和拉伸应力路径 (TE) 试验中得到剪切模量 G 。

由弹性力学可知, 对于线弹性介质, 只要求得任意两个弹性常数, 其余的常数可转换而成。

横观各向同性材料的常数也可以从常规三轴压缩应力路径试验中加以确定。取一块横观各向同性试样, 如在初始应力状态增加 $\Delta\varepsilon_x$, 而 σ_x 、 σ_y 保持不变, 则作 $\Delta\sigma_z-\Delta\varepsilon_x$ 、 $\Delta\sigma_z-\Delta\varepsilon_y$ 、 $\Delta\sigma_z-\Delta\varepsilon_z$ 的曲线, 由式 (2.2.2) 得

$$\left. \begin{aligned} \Delta\varepsilon_x &= C_{13}\Delta\sigma_z \\ \Delta\varepsilon_y &= C_{23}\Delta\sigma_z \\ \Delta\varepsilon_z &= C_{33}\Delta\sigma_z \end{aligned} \right\} \quad (2.2.10)$$

或

$$\left. \begin{aligned} C_{13} &= \frac{\Delta\varepsilon_x}{\Delta\sigma_z} \\ C_{23} &= \frac{\Delta\varepsilon_y}{\Delta\sigma_z} \\ C_{33} &= \frac{\Delta\varepsilon_z}{\Delta\sigma_z} \end{aligned} \right\} \quad (2.2.11)$$

然后, 另取同样的试样, 在初始应力增加 $\Delta\sigma_x$, 并作 $\Delta\sigma_x-\Delta\varepsilon_x$ 、 $\Delta\sigma_x-\Delta\varepsilon_y$ 、 $\Delta\sigma_x-\Delta\varepsilon_z$ 曲线, 同理得到

$$\left. \begin{aligned} \Delta\varepsilon_x &= C_{13}\Delta\sigma_x \\ \Delta\varepsilon_y &= C_{23}\Delta\sigma_x \\ \Delta\varepsilon_z &= C_{33}\Delta\sigma_x \end{aligned} \right\} \quad (2.2.12)$$

或