

高等学校教材

岩土工程数值分析

李同录 李萍 编著

陕西人民教育出版社

内 容 提 要

本书首先介绍了用于数值分析的数学和力学基础知识,然后详细阐述了有限差分法、有限单元法和边界单元法用于解决岩土工程中的渗流问题、固结问题、弹性问题的原理和方法。由于岩土体介质复杂,由固体、液体和气体三相组成,岩土工程问题的研究不仅要用到固体力学、也要用到渗流理论的知识,各种岩土工程问题可以用微分方程及其边值条件来表示。因此在本书中,数值分析主要是作为解微分方程的基本技巧来介绍的,采用的方法介于纯数学和固体力学之间,从而有利于读者深入理解数值方法的基本原理。

本书可作为岩土工程和地质工程专业高年级本科生和研究生的教材,也可作为上述专业工程技术人员和教师的参考书。

图书在版编目(CIP)数据

岩土工程数值分析 / 李同录, 李萍编著 — 西安: 陕西人民教育出版社, 2004.2

ISBN 7-5419-8940-1

I 岩 II ①李. ②李. III. 岩土工程—数值计算—高等学校—教材 IV TU4

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2004) 第 011400 号

岩土工程数值分析

李同录 李萍 编著

陕西人民教育出版社出版发行

(西安长安南路 181 号)

各地新华书店经销 陕西地质印刷厂印刷

787×1092 毫米 16 开本 17.5 印张 425 千字

2004 年 2 月第 1 版 2004 年 2 月第 1 次印刷

印数 1-1000

ISBN 7-5419-8940-1/T 11

定价 30.00 元

读者如发现印装质量问题, 请与印刷厂联系调换

厂址: 西安市雁塔北路 100 号 邮编 710054 电话: 87851488 87854794

作者序

“岩土工程数值分析”是为我校岩土工程和地质工程专业高年级本科生开设的选修课，为硕士研究生开设的必修课。通过该课程学习，使学生初步掌握利用计算机技术分析和解决岩土工程问题的基本原理和方法。自1996年开始，作者先后为水文地质与工程地质、岩土工程和地质工程专业的本科生和研究生讲授该课程，根据这几年的教学体会，深感这门课无论教师教，还是学生学都很吃力。究其原因，有以下几方面：一是教学计划中的课程设置不太合理，对本科生来说还缺乏必要的基础知识支撑；二是缺乏针对本专业特点和学生现有知识水平的教材；三是课时不够，难以在有限的时间内完成相应的教学计划。

岩土工程和地质工程是我国由计划经济向市场经济的转变时期，为了适应新的经济体制的产物。近二十年，随着我国教育体制的改革，对专业设置进行了多次大的调整。1982年同济大学率先将原来的工程地质专业调整为岩土工程专业，作为试办专业，1985年正式成立岩土工程系。其后岩土工程专业如雨后春笋一般成为各个大学的专业生长点，并很快发展成为本科、硕士、博士三个层次的人才培养体系。但目前的专业知识结构和课程体系还有待完善，就“岩土工程数值分析”这门课而言，首先需要扎实的数学和力学基础，而对于还没有学习“计算方法”和“弹塑性力学”等课程的本科学生，无论是学习数值法的基本原理还是求解技术都是有难度的。选修该课程就必须先选修“计算方法”和“弹塑性力学”等课程，因此教学计划中应安排相应的选修课，而且教学辅导员应在学生选课提出指导性建议，避免本末倒置的问题。目前的研究生教学中，“岩土工程数值分析”作为必修课，与该课程相关的一些基础课都安排在学位课中，课程设置总体上是合理的。

地质工程这一概念最初由我国工程地质学家孙广忠先生提出，他指出地质工程是指以地质体作建筑材料，以地质体作为工程结构，以地质体赋存环境作建筑环境的一种特殊工程。地质工程实际上是在工程地质学的基础上发展起来的，属于工程地质学与土木工程学的交叉学科。如果说工程地质工作主要是从事工程地质条件的勘察和评价，那么地质工程则主要是从事地质体和地质环境的开发、利用和改造。地质工程以工程地质学为基础，但对工程地质人员提出了更高的要求。该学科的产生是我国市场经济体制的形成和工程建设事业日益发展的需要。1997年6月，国务院学位委员会、国家教委将原水文地质与工程地质专业的一部分与探矿工程合并，调整为地质工程专业，相应的一级学科为地质资源与地质工程；地质工程作为本科专业首先出现在我国1998年实施的新专业目录中，地质工程属于勘查技术与工程和资源勘查工程两个专业进一步合并的引导性专业，它覆盖了1998年专业调整前地质类的全部工科专业。据统计，目前全国普通高等学校设地质工程专业的有14所，全国培养地质工程专业研究生的高等院校和科研院所所有17所。然而后来在专业目录中出现的地质工程专业并非我国工程地质学者开始所提出并倡导的“地质工程”，而且在内涵和学科归属上大相径庭。出现这一矛盾的原因是“地质”这一概念的外延甚广。我国工程地质界学者从根据工程实际的需要提出的“地质工程”和按学科意义的理解出现不一致，专业目录更偏重于对“地质工程”词义本身的诠释，因而涵盖了更多的内容。

“岩土工程”和“地质工程”这两个新学科在我国学术界一前一后地登场，仔细追究，他们有共同的渊源和归属。首先这两个学科都是在原有工程地质专业的基础上发展起来的，它们

都服务于工程建设，也就是土木工程建设。一般认为岩土工程属于土木工程学科，地质工程是工程地质与土木工程的交叉学科。二者在研究内容、理论体系和技术方法等有许多共同之处。但二者究竟是什么关系呢？作者认为这两个学科是不同专业的学者从各自观点出发对同一问题认识的两个侧面。客观上讲它们都是市场经济体制下的产物，都是我国工程建设事业发展所急需。但是以土木工程为主的学者从工程建设的需要出发，提出了“岩土工程”学科；而以工程地质为主的学者从地质体的利用和改造的意义出发，提出了“地质工程”学科。如果说修建在岩土体和岩土体内的工程都属于土木工程，那么土木工程也包括对岩土体的改造和利用。可以说“岩土工程”是从地上看问题，“地质工程”是从地下看问题，是从不同的角度研究同一个对象，二者在本质上是是一致的。

关于教材，总体上来说，岩土工程专业的教材建设落后于该专业教学和生产实践的需要。目前岩土工程方面的参考书、手册以及工程实录很多，但适合教学用的专业课教材甚少。数值分析方法的教材也很多，但很少有适合于本专业的教材。原因之一是多数教材侧重于理论与方法，与专业问题结合不密切，过于抽象，其次是本课程内容多，学时少，很难在有限的学时内完成教材安排的内容。鉴于以上原因，由我校教务处资助，并委托作者编写该教材。本教材努力克服已有教材的不足，并突出两方面的特色。一是知识结构完整，将涉及到的有关数学、力学知识与各类数值方法密切结合，形成一个完整的体系；二是密切联系岩土工程问题，详细阐述利用各种数值分析方法解决各类专业问题的原理和方法。

在本书中，数值分析主要是作为解微分方程的基本技巧来介绍的，采用的方法介于纯数学和固体力学之间。这样安排的理由一方面是由于对大学生知识特点的考虑；另一方面是对岩土工程专业特点的考虑。本科生在一、二年级系统地学习了高等数学课，但在后续的专业课中对数学的应用少，基础课与专业课之间脱节较为明显，而数值分析中用到了大量高等数学知识，这样安排使学生的数学知识在专业学习中得到深刻理解和巩固。岩土体介质非常复杂，一般情况下由固体、液体和气体三相组成，对岩土工程问题的研究不仅要用到固体力学、也要用到渗流理论的知识，而岩土工程问题可以用微分方程及其边值条件来表示，寻找求解这些微分方程在特定边界条件下的解就是解决岩土工程问题的过程。因此基于数学的数值分析方法具有更普遍的意义，从结构和固体力学出发建立的数值方法可以说是其具体应用。数值方法的数学原理，如变分法、加权残值法等也可以直接用来解决岩土工程问题，对研究生来说，掌握这些数学方法比学习数值分析方法更有意义。

本教材安排了以下内容：第一章绪论部分介绍了岩土工程学科的产生，当前工程建设中的岩土工程问题，岩土工程问题的解决方法，各种数值分析方法的特点及其在解决岩土工程问题中的适用性；第二章介绍了岩土体介质的本构模型和控制方程，这是数值分析的力学基础，第三章介绍了数值分析方法的数学原理，即变分原理及其近似求解，这是数值分析的数学基础。其后的章节分别介绍了有限差分法、有限单元法、边界单元法等数值分析的原理和解决岩土工程问题的方法。这里没有安排基于刚体极限平衡和运动学定律的离散元法，该方法虽然也采用数值解，但在数学和力学意义上与本书的方法不属于一个体系。数值分析方法很多，除以上外，近年来相继出现了一系列新的方法，如有限元中的节理单元法、块体理论、不连续变形分析、快速拉格朗日法、块体弹簧元法、无网络伽辽金法以及数值流形法，但作为数值法的基础教程，本书无意于介绍这些新的方法。

使用本教材时，对本科生和研究生可根据情况安排相应的内容。本科生，40学时，只讲授

前两章和有限差分法及二维有限单元法；对研究生，40学时，前两章自修，自第三章开始讲授，重点讲有限单元法。

本课程教学需安排在以下课程学习之后：材料力学、结构力学、弹塑性力学、岩土力学、计算方法和程序设计。

本书第一、三、五、六、七章由李同录编写，第二、四、八章由李萍编写，最后由李同录负责统稿。作者要感谢自己的一批忠实的弟子为此书所付出的劳动，曹雄、李荣峰和宋祥红熟练地输入了全部 WORD 手稿；邓宏科、曹雄用 CORDRAW 绘制了所有插图；邓小鹏、张常亮、龙建辉、相建华、雷晓峰、黄尚锦作了认真仔细的校对工作。还要感谢我校教务处李貅、陕西人民教育出版社编辑刘程在本书出版中的帮助与合作。

由于编者水平有限，谬误之处在所难免，恳请读者批评指正。

作者
2003年9月

目 录

第一章 绪论.....	1
第一节 岩土工程的产生与发展	1
第二节 工程建设中的岩土工程问题	2
第三节 解决岩土工程问题的程序与方法	7
第四节 岩土工程数值分析的特点	11
参考文献	14
第二章 岩土工程问题的基本方程与边界条件	16
第一节 岩土弹性介质的基本方程	16
第二节 土体孔隙介质的基本方程	28
参考文献	37
第三章 数值分析的数学原理	38
第一节 变分法的概念及原理	38
第二节 近似的变分法	53
第三节 弹性力学中的变分原理	68
参考文献	78
第四章 有限差分法	79
第一节 有限差分公式	79
第二节 弹性地基上基础的有限差分解	82
第三节 Terzaghi 固结方程的差分解	90
第四节 Biot 固结方程的差分解	93
第五节 稳定渗流问题的差分解法	95
参考文献	97
第五章 一维问题有限元分析	98
第一节 有限单元法的概念与解题步骤	98
第二节 杆件轴向受力的有限元分析	102
第三节 梁弯曲问题的有限单元分析	116
第四节 等参数单元及一维插值函数	131
第五节 数值积分	134

参考文献	142
第六章 二维问题的有限元分析	144
第一节 有关渗流问题的有限单元分析	144
第二节 平面弹性介质的有限元分析	164
第三节 二维有限单元的插值函数	175
第四节 等参元和数值积分	186
参考文献	203
第七章 三维问题的有限元分析	204
第一节 Biot 三维固结方程的有限元模型	204
第二节 Biot 三维固结有限元模型的求解	210
第三节 空间单元的插值函数	224
参考文献	233
第八章 边界单元法	234
第一节 基本解	234
第二节 渗流问题的边界单元法	241
第三节 岩土弹性介质的边界元法	253
第四节 边界元和有限元的结合解法	268
参考文献	270

第一章 绪 论

第一节 岩土工程的产生与发展

岩土工程的英文表达是 Geotechnic，西方国家对岩土工程的理解是“各项土木工程中涉及岩石或土的利用、整治或改造的科学技术。以土力学、岩体力学及工程地质学为理论基础，通过各种勘测和计算机及数值分析等方法，并结合工程设计施工条件及在动力地质作用下的场地地基性状，以及施工开挖、支护、降水等特殊要求，提出对岩土的评价，并指导工程的设计和施工。”在中国，对岩土工程概念的认识不尽相同，按我国国家标准《岩土工程勘察规范》的定义：岩土工程即以土力学、岩石力学、工程地质学和地基基础工程学为理论基础，以解决和处理在建设过程中出现的所有与岩土体有关的工程技术问题的一门地质和工程紧密结合的新专业学科，属于土木建筑工程的范畴。

岩土工程是随着土木工程建设而发展起来的，例如在土木工程建设中最早遇到的是土体稳定问题，土力学理论最早的贡献是 1773 年建立了库伦(Columbus)强度理论，随后 1857 年发展了朗肯(Rankine)土压力理论，1926 年费伦纽斯(Fellenius)提出了边坡稳定性分析的圆弧条分法理论。为了分析软粘土地基在荷载作用下沉降随时间发展的过程，太沙基(Terzaghi)于 1925 年提出了一维固结理论。这些都是岩土工程的经典理论。

岩土工程作为一门学科产生历史较短，在国外只有 40 余年的历史，国内仅 20 余年。在国际上，二次大战后，特别是在 20 世纪 60 年代以来，随着技术经济的高速发展，以及电子技术和计算机技术的发展，使计算分析能力和岩土测试技术得到提高和进步，岩土工程在一些发达国家兴起，该专业是市场经济国家目前普遍实行的专业体制。我国岩土工程专业体制始于 80 年代初期。解放初期，我国学习前苏联的模式，实行的是工程地质专业体制。改革开放后，由于原有的专业体制不能适应市场经济发展的需求，我国有关部门开始探讨向岩土工程专业体制过渡的路子。

1979 年，我国第一个岩土工程考察团访问了加拿大，全面了解了加国岩土工程的先进经验和技术水平，得到了我国主管部门的高度重视，并决定了在全国范围内逐步推行岩土工程体制。1980 年 4 月至 6 月，原国家建筑工程总局为了探讨在我国推行岩土工程体制的可行性，举办了“岩土工程专题研究班”，随后印发了“关于改革现行工程地质勘察体制为岩土工程体制的建议”一文，为我国工程勘察向岩土工程转化迈出了第一步。但由于受当时历史客观条件的限制，最初几年推行岩土工程体制进展不大。中国的岩土工程主要是 1986 年以来，在有关部门和有识之士的大力倡导和扶持下，才逐步发展起来的。

与工程地质勘察相比，岩土工程要求勘察与设计、施工、监测密切结合，而不是彼此机械分割，要求服务于工程建设的全过程，而不是单纯为设计服务；要求在获取系统而准确资料的基础上，对岩土工程利用、整治方案深入论证；提出技术可行、经济合理的具体

建议，而不是单纯地提供岩土技术资料。因而，这种体制更贴近工程实际，更侧重于解决工程实际问题，从而要求技术人员具备全面的知识，为工程建设做出更大的贡献。二十几年来，由于广大科技人员的不懈努力，从科研、教学、标准规范到工程实践，岩土工程专业体制在我国已基本形成。目前随着我国工程勘察体制改革的深化，注册岩土工程师执业制度的确立，进一步完善技术立法、经济立法、加强技术创新和应用新技术，岩土工程体制将趋于完善，并逐步与国际接轨。

在土木工程建设中，岩土工程的地位非常重要。以建筑工程为例，岩土工程在总造价和总工期中均占 1/3 左右，岩土工程问题往往是影响投资和制约工期的主要因素，如果处理不当，有时会带来灾难性的后果。自我国实行岩土工程体制以来，加强了勘察、设计、施工之间的协作配合，给国家建设带来了十分可观的经济效益；但也发生了大量的工程事故，造成了巨大的经济损失。

我国在改革开放以前，岩土工程工作者较多的注意力集中在水利、铁道和矿井工程建设中的岩土工程问题；改革开放后，随着高层建筑、城市地下空间利用和高速公路的发展，建筑工程、市政工程和交通工程建设中的岩土工程问题愈显突出。土木工程功能化、城市立体化、交通高速化，以及改善综合居住环境成为现代土木工程建设的重点。人口的增长加速了城市发展，城市化的进程促进了大城市在数量和规模上的急剧发展。人们将不断拓展新的生存空间，开发地下空间，向海洋拓宽，修建跨海大桥、海底隧道和人工岛，改造沙漠等，因此岩土工程的发展任重而道远。

第二节 工程建设中的岩土工程问题

如果说修建于岩土体之上或之内的工程都属于土木工程，则岩土工程可以说是土木工程建设中的“基础工程”，涉及到土木工程的各个领域。从工程的功能来讲，土木工程包括建筑工程、水电工程、道路工程、矿山工程、核电工程、港口工程等，未来还可能出现新的工程领域。然而各类工程建设领域存在着共同的岩土工程问题，这些问题可归结为：地基稳定性问题、边坡稳定性问题、围岩稳定性问题和渗透稳定性问题。岩土工程工作者首先应了解这些问题的特点，掌握解决它们的一般方法，再结合各类工程的实际，从事相应地设计和治理工作。

一、地基稳定问题

各类土木工程都存在地基稳定性问题，诸如建筑地基、道路路基、大坝坝基、桥梁墩台地基等，该类问题同属于下部岩土体要承受来自上部结构的荷载，以垂直的结构重力作用荷载为主，地震和风等水平荷载其次。地基稳定性有两方面的含义，一是地基岩土体在上部荷载作用下是否发生破坏，即强度是否满足要求；二是地基岩土体在上部荷载作用下是否发生过量沉降，使建筑物失去预定的功能。建筑物地基一般要同时满足承载力的要求和小于某一沉降量(包括沉降差)的要求。有时承载力满足要求后，其沉降是否满足要求基本上可以不验算。这也有两种情况：一种是承载力满足后，沉降肯定很小，可以不进行验算，例如端承桩基础，另一种是对变形没有严格要求，例如一般路堤地基和砂石料等松散原料堆场地基等。也有沉降量满足要求后，承载力肯定满足要求而可以不进行验算，在这

种情况下可按沉降量控制设计。在深厚软粘土地基上建造建筑物，沉降量和差异沉降量控制是问题的关键。软土地区建筑地基工程事故大部分是由沉降量或沉降差过大造成的，特别是不均匀沉降对建筑物的危害最大，合理控制沉降量非常重要。对该类地基应该按沉降控制设计标准，这样既可保证建筑物安全又可节省工程投资。但按沉降控制设计不是可以不管地基承载力是否满足要求，按沉降控制设计本身已包含对承载力是否满足要求进行验算。解决地基稳定问题的技术方案是采用适当的基础形式或采取必要的地基处理措施。

对地基稳定性问题的研究总体来说包括三个方面：

一是天然地基岩土体的强度与变形特性的研究，对于高度不大荷载较小的建筑物优先考虑发挥其天然地基土的潜力；同时对天然地基土工程特性的研究是进行地基处理和选用合理的基础型式的依据。

二是地基处理技术与处理后地基土的工程特性的研究。目前的工程建筑日益向高和深处发展，天然的岩土地基多数情况下难以满足工程要求，因此各种地基处理技术不断得到发展和完善，对于岩质地基主要是强度和渗漏问题，固结灌浆和帷幕灌浆是常用的处理方法；土质地基强度和变形问题突出，针对置换、强夯、挤密、预压固结、注浆胶结等各种方法的新工艺在不断产生和发展。根据建筑物对强度、变形和渗透等技术参数的要求，对于处理后的地基预测评价，是选择适宜的处理方法和确定有关设计指标的关键。

三是深基础及其与地基相互作用的研究。在天然地基和处理后的地基都不能满足要求的情况下，自然考虑到采用深基础，如桩基础、箱型基础和沉井基础。这些基础与周围土层协同作用来支撑上部的结构荷载。因此不仅要研究地基土的特性和基础的特性，而且要研究二者的相互作用，由此才能做出经济可靠的设计方案。伴随着深基础工程而出现的是深基坑工程，深基坑的边坡稳定性、渗流稳定性问题，基坑支护、基坑降水以及防排水等又为地基工程提出了一些新的值得研究的问题。

二、边坡稳定问题

公路、铁路穿越山岭区，水电工程库岸和坝肩，山区的楼房建设，露天矿的矿坑都存在着天然边坡和人工边坡稳定性问题。目前岩土边坡工程的开挖深度已经高达百米甚至数百米以上，尤其是岩质边坡，如三峡永久船闸边坡高达 170 多米，抚顺露天矿边坡已达 600 米以上。该类问题属于岩土体在以重力为主作用下的稳定性问题，若采用支挡结构，则结构要承受来自岩土体的荷载。一般来说，边坡具有维持自身稳定性的潜在能力，大部分天然边坡在其演变中已经适应了各种自然营力的作用而处于稳定状态，人工边坡可通过与自然边坡的类比或通过稳定性分析设计合理的坡形使其达到稳定性要求。然而在人类工程活动中，边坡稳定性问题依然突出，这一方面是由于自然动力或工程建设改变了自然边坡状态，如坡脚侵蚀、开挖，坡体上堆载或修建工程，由此必然破坏了边坡原有的平衡状态；另一方面，由于场地条件的限制或经济技术等原因，人工边坡的坡形不能仅根据其稳定性而设计。如对于高边坡而言，坡度减缓将意味着土方量大量增加，占有土地增多，投资必然加大，这就有必要与采用较陡的坡形结合工程支护方案进行经济对比而决策。对于建筑深基坑边坡来说，大部分位于建筑密集的城市，基坑内部受基础的限制，基坑外围受周围建筑物的限制，按稳定坡角放坡是不可能的，因此大部分采用直立边坡结合支护方案。对于不稳定的边坡则要评价采取支挡结构后的稳定性。

与地基稳定性问题一样，边坡稳定性也要从强度与变形两个方面来评价，具体应结合工程特点和要求来确定以哪方面为主。如道路路堤边坡变形和强度都应满足稳定性要求；而路堑边坡在临近没有建筑物时，只考虑强度稳定性就可以了；深基坑的边坡稳定性，若临近有建筑物，不仅要评价基坑壁的整体稳定性，还必须预测基坑外围变形对建筑物的不利影响；若临近没有建筑物，只考虑基坑侧壁的暂时稳定性就可以了；山区的楼房修建在斜坡上，必须评价斜坡的整体稳定性以及斜坡变形是否超过了建筑物对变形的最大限制。

边坡破坏形式主要有滑坡和崩塌两种。崩塌一般规模较小，影响范围有限，工程危害性不大。滑坡是最普遍的边坡破坏形式，无论是自然营力作用下产生的，还是人类工程活动下引发的滑坡广泛存在，其工程危害性巨大。因此对边坡的稳定性评价主要是预测其在滑动或崩塌的可能性；对现已形成的滑坡评价主要是预测其沿已有滑动面滑动的可能性，实际上由于软弱面的存在，同等条件下滑坡的稳定性比边坡的稳定性低得多，因此由工程建设诱发的老滑坡的复活要远远多于新滑坡的产生。

对边坡稳定性的研究主要包括以下两个方面。

1. 自然或人工边坡稳定性的评价方法的研究

边坡的稳定性与边坡的坡形、坡角、坡高和边坡岩土体的物理力学特性密切相关，边坡稳定性评价是进行边坡设计和支挡方案决策的依据。边坡稳定性评价存在两方面的关键问题：一是评价力学模型的建立和计算参数的确定；二是对潜在滑动面形状的假定和滑动面位置的确定。对这些问题的研究，国内外学者提出了许多方法，也积累了丰富的实践经验。尽管如此，由于边坡岩土体的复杂性和对自然环境及人类工程活动的敏感性，边坡的稳定性分析方法仍待进一步探讨和研究。

2 是边坡治理技术及其可靠性的研究

对工程建设中的不稳定边坡应采取必要的治理措施。边坡治理一方面可通过改变坡形或改良土质以及地下水状态使岩土体自身应力、应变状态进行调整，恢复到稳定状态；另一方面可采取结构措施，通过支挡或锚拉等方法增强其稳定性。近年来，在山区公路建设和城市深基坑工程的推动下，各种边坡治理的新技术和新工艺不断涌现，但在治理工程设计中，尚存在着许多不确定性因素，工程事故时有发生，因此对各种技术可靠性的研究有待深入。

三、围岩稳定性问题

随着采矿、水电、核电、交通和城市建设的发展，岩土地下工程的规模日益加大，地下工程已成为岩土工程学科的重点研究方向之一。矿山巷道、公路和铁路隧道、水电工程的大型地下厂房、导流洞、引水洞和溢洪洞，核电工程中的引水洞等，由于地下开挖改变了岩体的初始应力状态，使围岩发生变形和破坏。地下洞室开挖后，围岩中的应力重新分布，重分布应力若超过了岩体的抗压、抗拉或抗剪强度，围岩则发生破坏。围岩中的应力与岩体中的初始应力状态、围岩的物理力学性质及岩体结构类型、洞室的断面形态及大小、地下水等因素有关，特别是岩体中结构面的发育，岩体结构复杂，不确定性因素较多。围岩中的重分布应力很难采用理论公式准确计算。目前在矿山、公路、铁路和水电工程中的围岩稳定性评价仍以围岩分类为基础的定性评价为主，各部门的围岩分类标准也不一致。围岩的支护设计也是以围岩分类为依据，围岩压力是根据围岩类别和岩体结构类型的特点

采用相应的模型计算。例如对于不具有粘聚力的散体结构和碎裂结构的岩体，砂质土体可采用普氏塌落拱理论计算；对粘性土可采用太沙基理论；对相对完整的岩体可采用弹塑性理论计算；对于坚硬大块状结构的岩体可采用块体极限平衡理论计算。

围岩稳定问题与边坡稳定性问题一样，由结构承受来自岩土体的荷载。围岩自身具有一定的承载能力，当围岩类别高时，围岩自身可以满足稳定性要求，不需要支护；围岩类别低时，则要求支护结构承担部分荷载。由于各类地下工程的功能不同，其支护设计的目的和标准也不同。矿山开采中的巷道属于临时工程，只要求在开采期间围岩保持稳定，开采结束则放弃支护；由此会在地下形成大量采空区，采空区坍塌会导致地表塌陷，给后期地表工程建设带来极大危害。而公路、铁路和水电建设中的地下工程属于永久性工程，其支护结构的设计标准要高，而且这类工程一般在山区，其埋深较大，一般对地表不会产生影响。

围岩稳定性与地基和边坡一样，也是由围岩强度和变形两方面来控制。对于地下空间本身来说，对围岩的变形量要求并不严格，然而围岩的应力和强度都随其变形量呈非线性的变化，控制其变形的目的是为了适当地降低围岩应力的条件下，使围岩保持相对较高的强度，从而降低支护结构上的围岩压力，发挥围岩自身稳定性的潜力。地下空间在开挖后，围岩中的应力立即重新分布，硐壁上的径向应力为零，切向应力会发生集中；硐壁径向位移增大会使集中的应力不断释放。如果岩体结构松散或岩石软弱，径向会很快发生位移，应力来不及集中，就会释放，围岩松动，形成松动圈，松动圈内的岩石裂隙张开，岩体强度也迅速降低，由此会导致大范围塌落，因此对该类岩体应及时予以支护。如果岩体完整，岩石较坚硬，在围岩中会形成切向应力集中区，随着径向位移增大，硐壁附近的集中应力会逐步释放，因而在围岩中自硐壁向外会依次形成松动区、应力集中区和天然应力区，松动区的范围随着径向位移的增大而扩大，同时会导致岩体中的裂隙张开，岩体强度降低。因此适当地选择支护衬砌时间，即根据控制位移量进行支护，既可降低衬砌上的围岩压力，又可使岩体具有足够的强度，达到结构与围岩协同作用的目的。通过工程地质、水文地质条件、地下空间的形态和尺寸，以及围岩与结构相互作用及其变形与破坏机理的分析，形成的边施工、边监测、边设计、边支护的动态反馈设计方法在大型地下工程的发展中发挥了重要作用，取得了显著的社会和经济效益。

近年来，城市地下交通和地下建筑成为地下工程中的一个突出的发展方向。国内外不少专家认为：19世纪是桥梁的世纪，20世纪是高层建筑的世纪，未来21世纪是地下空间的世纪，并预测21世纪末将有1/3的世界人口生活在地下空间。据有关统计，每年有约3000万人涌向城市，对城市地下空间的开发利用可作为解决城市人口、资源、环境三大危机的重要措施和医治“城市综合征”，实施可持续发展的重要途径，发达国家的工程实践已经证明了这一点。我国北京、上海、天津的地铁开通，极大地缓解了这些城市的交通问题，正在兴建的地铁有北京三号线、上海二号线、广州一号线。国家已经批准和正在筹建地铁的城市有深圳、南京等20多个城市，预计本世纪初至中叶将是我国大规模建设地铁的年代。地铁建设将成为我国本世纪城市地下空间开发的重点。

城市地下工程与矿山、水电和交通工程中的地下工程中相比，有其特殊性。从地质条件来讲，城市地下工程的地质条件更为复杂。由于城市是适应自然环境而发展起来的，大型城市多位于河流三角洲或冲洪积平原地区，该类地区下部为巨厚的松散堆积，地下水位

浅，城区自然河流或人工运河纵横，这些都会使地下工程建设面临更多的难题，传统的以围岩分类为基础的支护设计和施工工艺显然不适用。从建设环境来讲，城市地下工程的埋深都比较浅，地面建筑物密集，地下工程建设对地面建筑的影响十分敏感，而且地下施工原则上不能影响地面建筑物的正常运营，因而对城市地下工程的设计和施工技术提出了更高的要求。另外，有些城市还存在着特殊的岩土工程问题。如西安市的地面沉降和地裂缝对地铁建设会造成极为不利的影 响。我国在城市地下工程建设中，引进了许多国外先进技术，如在软土中掘进的盾构技术、过江隧道的沉井技术等，通过多年的工程实践，也积累了许多经验，制定了城市地铁和轻轨交通技术规范，这对我国未来城市地下工程建设将起到重要的指导作用。然而随着工程建设的深入，将会涌现大量新的技术问题，相应的理论设计、工程实践问题也需进一步研究和深入探讨。同时，总结已有施工经验、推广先进技术，提高工程质量，治理和保护环境将是十分艰巨的任务。

四、渗透稳定问题

地下水作为流体介质存在于固体的岩土介质中，使岩土工程问题更为复杂。地下水在地基、边坡和洞室围岩中都发挥了其不利的作用，其影响主要体现在三个方面：一是改变了岩土体的性质；二是静水压力的作用；三是动水压力的作用。

地下水对各种岩土体都具有不同程度的软化作用，因岩土体的性质不同，地下水作用机理和影响程度也不一样。对于可溶性岩土，如岩盐、石膏岩、芒硝和盐渍土，以溶蚀作用为主，地下水将可溶性物质溶解迁移，使部分岩土颗粒间丧失胶结，强度降低；泥质砂岩、泥岩等以泥质胶结为主的岩石，遇水软化性极强，主要是由于胶结物不抗水，连接减弱，岩体强度降低；而钙质和硅质胶结的砂岩、以及大部分块状结构的岩浆岩和变质岩遇水软化性低，该类岩石无论是胶结物还是其矿物颗粒对水都不敏感，水对岩石的强度影响不大；而具有类似物质组成的片状结构的岩石，如页岩、绢云母片岩、板岩等，由于层理和片理中渗入地下水而起到润滑作用，呈现出明显的各向异性，强度也大为减弱。地下水对分选好的粗粒土，如冲积的漂石、卵石和砾石的性质影响不大，在这类土中地下水以自由水的形式存在，不影响土粒间的连接；若粗粒土中含有少量粘性土，如坡积、洪积的块石、碎石和角砾，地下水使其粒间连接和支撑都会减弱，强度明显降低。砂质土中砂粒亲水性弱，地下水主要以重力水的形式存在，但由于水的润滑作用，砂粒间的咬合力和表面摩擦力都会有一定程度的降低，使其强度相应减弱；地下水对粘性土的影响显著，因含水量不同，粒间连结力的性质和大小均有差异。含水量低于塑限时，粒间以强结合水连结，土体呈固态，强度高；含水量高于塑限低于液限时，粒间以弱结合水连结，土体呈塑态，强度较低；含水量高于液限时，粒间为自由水，土体呈流态，土体丧失其强度；粉土的性质介于粘性土和无粘性土之间，地下水在其中以毛细水形式存在，毛细水有一定弱连结，但往往给工程带来不利影响。

岩土中的静水压力可以理解为孔隙水压力，根据有效应力原理，总应力等于有效应力与孔隙水压力之和，而岩土体的变形和强度都是由有效应力引起，孔隙水压力增大，意味着有效应力降低，减缓土体的固结变形，岩土体的强度降低；孔隙水压力减小，意味着有效应力增强，增强土体的固结变形，岩土体的强度增高。在实际工程中，实测的无粘性土中的孔隙水压力等于相应位置的静水压力，孔隙水压力容易计算求得，因此一般采用有效

应力分析法，取排水剪测得的有效强度指标；而粘性土中实测的孔隙水压力小于相应位置的静水压力，这是由于水在粘性土中多以结合水的形式存在，水分子受到土粒表面能的束缚，静水压力不能沿孔隙自由传递，因此粘性土一般采用总应力分析法，取不排水剪测得的有总应力强度指标。在地基、边坡和地下工程中，静水压力对工程的影响和危害各有特点：城市大量抽取地下水导致地面沉降，是由于地下水位下降，孔隙水压力降低，有效应力增大的缘故。在地下水位浅的深基坑工程中，需采取降水或隔水措施以减小或阻止孔隙水压力的不利作用；在边坡中孔隙水压力会增大下滑力和减小抗滑力，使边坡稳定性大大降低，地下工程围岩中的静水压力增大了围岩压力，使稳定性条件大为恶化，在施工过程中会发生突水和涌水现象。

动水压力是岩土中的地下水在渗流过程中对岩土颗粒产生的渗透力。地下水沿一定的路径流动，沿流线有水头降或水力梯度，动水压力与水力梯度成正比。在深基坑中，基坑内外水力梯度大时，动水压力超过土的浮容重，则会导致基坑底部流沙或涌土；坝基底部水力梯度大时，会导致潜蚀甚至流土，发生渗透变形，边坡中的动水压力会加大下滑力，渗透变形也会使边坡稳定性急剧降低。因此在有地下水流的岩土工程评价中，必须考虑动水压力的影响，并根据土体的物质组成和水力梯度分析是否具有渗透变形的可能性。

以上是我们最常见的岩土工程问题，在岩土工程中，也会遇到环境问题，如岩土工程施工引起的噪音污染、土壤污染和地下水污染等也日益受到重视；又如湿陷性黄土、膨胀性岩土、盐渍土、冻土等特殊土引起的特殊岩土工程问题都予以专门研究和解决。然而以上四方面的问题是各类工程中都会遇到的共同的问题，岩土工程师都应了解这些问题的特点和解决途径。

第三节 解决岩土工程问题的程序与方法

在大量的工程实践中，我们已经形成了解决岩土工程问题较为成熟的程序和方法，而这些方法在工程实践中将会不断地补充和完善。

一、解决岩土工程问题的程序

工程建设中的岩土工程问题涉及到工程建设的全过程，解决岩土工程问题的主要程序主要有如下五个步骤：

1 岩土工程勘察

按有关规范、规程的要求，结合工程实践经验，通过各种勘测、测试和分析计算等方法确定场地的工程地质条件及岩土体工程特性，结合工程施工、开挖、支护、降排水等要求，进行技术论证，提出解决岩土工程问题的决策性建议，并对基础、边坡或地下洞室等工程的设计和施工做出指导性建议。

2 岩土工程设计

包括地基加固处理设计，桩基础设计，基坑支护或降排水设计，边坡或岸坡的防护、支挡设计，滑坡整治设计，地下工程的支护和防渗设计，并对岩土工程施工引起的环境问题做出治理设计等。

3 岩土工程施工

根据设计方案进行现场施工，包括地基加固处理，基坑、边坡或岸坡的开挖、防护和支挡工程，滑坡整治工程，地下工程的开挖、加固和防渗工程以及环境治理等。

4 岩土工程监测

在施工过程中进行监测，一旦发现问题，便于及时采取措施；施工后继续监测，以便检验施工质量和效果，直至岩土体变形稳定，工程正常运行。包括建筑物沉降、变形观测；基坑开挖引起的坑底回弹、地表位移监测，基坑支护中的土压力、孔隙水压力监测，深层位移、支撑轴力监测；边坡及滑坡体的位移观测，支挡结构的位移监测；地下工程开挖、支护过程中的侧壁位移、应力观测及地面变形监测等。

5 岩土工程监理

按规范和合同的要求，进行技术、质量、工程进度的监督。包括对岩土工程勘察、设计及施工的某个环节或全部从技术经济、进度等方面进行检查、监督，控制工程质量，及时解决出现的问题，保证岩土工程施工经济、合理、快速实施。

二、解决岩土工程问题的方法

岩土工程的研究对象——岩体和土体，既作为土木工程的建筑材料，也作为建筑环境和建(构)筑物的组成部分。岩土体在其形成和存在的整个地质历史过程中，经历了各种复杂的地质作用，工程性质通常是各向异性和非均质的，复杂而多变的。要解决岩土工程问题，单凭工程经验或分析计算都是难以实现的，通常需要将定性分析与定量计算相结合，室内试验与现场试验相结合，通过综合分析才能做出正确的决策和设计方案。总体来说岩土工程问题的解决方法有经验类比法、试验测试法、解析方法和近似求解法，各类方法及其关系如图 1-1 所示。

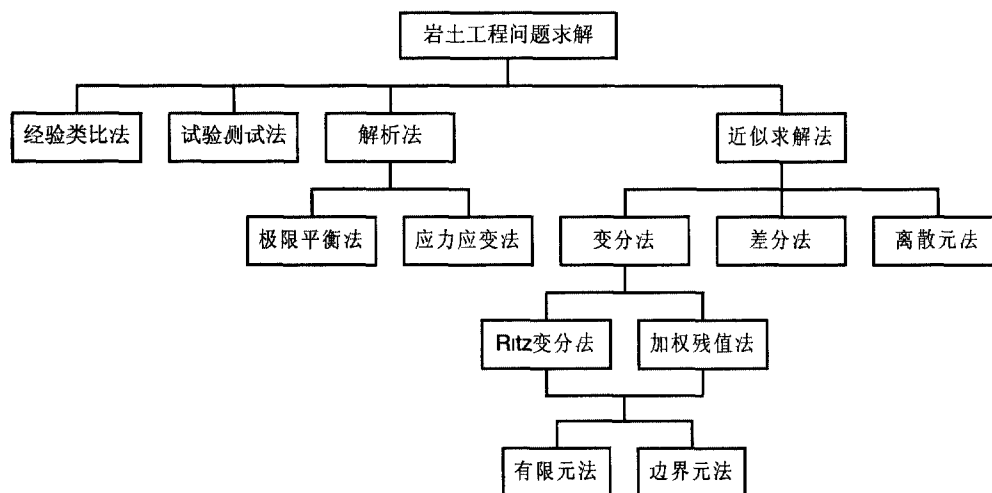


图 1-1 岩土工程问题的解决方法

1 经验类比法

岩土工程专家根据研究对象的工程地质条件和岩土工程特征，凭借自身的工程经验往往会做出判断，以指导工程决策。这种判断的过程实际上是专家们不自觉地将他们所从事过的已有工程案例与目前的工程对象进行对比，在地质条件和岩土特征相似的情况下，已

有的成功经验可为当前工程所用。经验类比就是定性分析的方法。尽管经验方法不如定量计算科学、严谨，但由于岩土介质的复杂特点，经验类比法是如何其他方法都不能取代，而且在工程决策中起决定作用的方法，这一点应该说是岩土工程从业人员的共识。因此岩土工程师决不能限于理论计算和计算机模拟，应当积极从事工程实践，根据工程实际对理论进行检验并修正。对于重大工程的决策，往往需要一些有丰富经验的专家集体来决策。而对于一般的岩土工程问题，岩土工程师可根据自己的认识和有关规范中提供的经验数据给出有关的岩土工程参数。例如简单场地上的一般建筑，地基承载力可根据室内土工试验指标和孔内动探数据或现场静力触探试验曲线查规范中的相关表格确定；边坡的稳定开挖角度也可根据边坡岩土的性质查表确定；硐室的围岩类别主要是根据现场对岩体结构和岩石性质的鉴别，结合钻孔岩芯的完整性和钻孔测试数据，按各行业给出的围岩分类标准确定。围岩类别是地下工程稳定性评价和支护设计的依据，目前的围岩类别划分仍以定性方法为主。规范中的各种表格数据是根据已有工程进行总结或通过对比试验确定的，它本身就说明了在相似条件下可采用“将古论今”的原则。

在岩土工程专业知识中，也包括了丰富的经验方法，多数初次从业的人员是通过学习来掌握这些知识的，例如在钻探过程中要对岩土进行鉴别和分类，根据掌握的知识对其工程特性有一定的认识后，可初步判定其承载力，这种定性的判断与最终利用测试数据查经验表格和进行计算获得的结果不应有太大的出入，否则应当仔细地分析原因。对边坡和滑坡稳定性的评价更要重视现场调查，根据地形地貌、植被发育、地下水出露和地表变形迹象不难对其做出判断，室内计算或数值模拟在一定程度上可以说是为了验证现场的认识，并获得相应的设计参数。如果计算结果与定性认识有矛盾，必须仔细地分析模型是否与地质条件吻合，计算参数取值是否合理。

经验类比的方法在岩土工程问题的宏观认识和方案决策中具有重要指导意义，例如根据地基岩土条件决定选用适当的基础或地基处理方法，根据滑坡或边坡的工程地质条件选用合适的治理方案，根据围岩的类别和工程要求选用最佳的支护方案的施工工艺等，这些问题的决策都要依赖于工程师们的经验。经验方法具有主观性，当对宏观方案已做出了决策，针对具体方案进行设计时，需要确定岩土工程参数，很显然岩土工程参数不能单凭主观经验给定，此时试验与测试方法必不可少。

2 试验方法

就地基(天然地基、复合地基)和桩基础的承载力、沉降量而言，原位载荷试验是最可靠最有效的方法。大家已经注意到，新一代的岩土规范和地基规范已将老规范中的经验表格取掉了，相应地加大了现场试验与检测的量。这样调整具有两方面的意义：一是对从业人员的专业素质提出了更高的要求，工程师在解决岩土工程问题是必须依赖自己的经验。老规范中的表格给出的取值范围，仅在一般条件下适用，如果不顾实际工程地质条件生搬硬套，会导致工程不安全或造成浪费。二是加大试验和检测的量，自然会提高参数的可靠性，使岩土工程设计更加科学合理。任何一个岩土工程设计都是在经济与安全之间寻求一种合理的平衡。参数可靠性低时，将意味着增加工程投资以提高安全储备；参数可靠性高时，二者之间将会找到一个最佳的平衡点，使工程经济又安全。原位试验尽管费用高、周期长，但它是保证设计方案科学合理的根本，由此带来的经济效益是极为可观的。

由于试验与实际受荷方式相似，地基承载力现场测试的结果也最可靠。但像挡墙土压

力、滑坡推力、围岩压力等参数并不能现场实测以供设计之用。这类参数需采取试样进行室内试验或做现场原位试验获取岩土性质参数，选取适当的模型进行计算。工程施工中，利用埋置在支挡结构物中的传感装置可以测定其应力应变，并反算出岩土体对结构的作用力。由此可以检验设计方案是否合理，必要时对方案进行调整。

模型和模拟试验也常用于岩土工程问题的研究，但目前也只能给出规律性的认识和定性的结果。由于岩土体性质的非线性特点，基于模型和模拟试验的相似理论难以适用于岩土体的模拟。而岩土参数的反算相当于用研究对象作实体试验，这在解决岩土工程问题中更具有实际意义。例如根据变形迹象确认处于临界状态的滑坡，可以给定其稳定系数，反算其抗剪强度参数，再利用反算强度参数计算滑坡推力，根据滑坡推力进行支挡设计。这相当于拿滑坡实体做试验，测定其抗剪强度参数。如果仅有一个滑坡断面，应给出粘聚力和内摩擦角中的一个，反算另一个；若有两个以上的滑坡断面，可联立求解粘聚力和内摩擦角。

3 解析方法

(1) 极限平衡法

如上所述，许多岩土工程的设计参数不能直接测定，而是利用岩土的物理力学性质参数计算确定。目前用于岩土工程计算的解析方法有两大类，一是基于理论力学的刚体极限平衡法，二是基于弹塑性力学和有效应力原理的应力-应变分析法。

极限平衡法一直用于解决岩土工程中各个方面的问题，地基承载力的极限荷载，边坡稳定性分析的各种条分法，围岩稳定性分析中的块体平衡理论、普氏塌落拱理论都是基于极限平衡法建立的计算公式。

极限平衡分析中，块体平衡都属于超静定问题，一般要做出一系列假定以减少未知量，并使未知量的数目与已知方程尽可能相等。由于不同的学者做出的假定条件不同，便产生了各种方法。例如边坡稳定性分析中的 Fellenmus 法和简化 Bishop 法，都假定滑动面为圆弧形，各分条满足对圆心求矩的力矩平衡以及沿滑动面方向力的平衡。这两种方法有一条假定不同，Fellenmus 法假定各分条满足垂直滑动面方向力的平衡，而简化 Bishop 法假定满足铅垂方向力的平衡，因此大家知道两种方法的计算公式大不一样。边坡稳定性分析的数十种方法都是基于不同的假定导出的。

值得指出的是，极限平衡是一种虚拟的平衡，我们研究的岩土体不一定处于极限平衡状态。为了建立平衡方程，在理论上我们可以采取三种处理办法

①增大滑动力矩或减小抗滑力矩使其处于极限平衡状态，这种情况要求各块体有相同的转动点，因此只适合边坡分析中的圆弧滑动面的情况。

②增大滑动推力以使其处于极限平衡状态，适合各种情况，例如滑坡稳定性分析的推力传递法的稳定系数计算公式就是在这种情况下导出的。

③减小抗滑力以使其处于极限平衡状态，适合各种情况，如滑坡稳定性计算中的 Janbu 法和 Sarma 法计算公式都是在这种情况下导出的。

以上三种情况对应于对稳定系数的三种定义，稳定系数反映了岩土体实际状态与极限平衡状态的差异，稳定系数为 1 时，表明实际状态就处于极限平衡状态。

(2) 应力-应变法

极限平衡法适合于岩土体整体稳定性分析，不能反映介质内部的应力和变形情况。应