

岩土力学进展

陈祥福 主 编
袁文伯 副主编

中国展望出版社

岩土力学进展

陈祥福 主编

中国展望出版社

内 容 简 介

本书反映了我国岩土力学研究进展和水平,以及国外动态。内容包括岩土力学本构关系、岩石变形与破坏理论、断裂与损伤、数值计算和力学分析、实验岩石力学、喷锚支护、边坡稳定、采场及巷道支护、变形控制、围岩分类、围岩加固、工程实例和模拟实验等。同时应用模糊数学、概率论、拓扑学、可靠性数学、数理统计等探讨了围岩非连续、非均质和非线性以及非确定性岩土力学问题。内容丰富,具有重要参考价值。

本书可供从事土木、建筑、采矿、冶金、能源、交通、城建和国防等岩土工程科研、设计和施工的技术人员、高校师生和研究生参考。

岩 土 力 学 进 展

陈祥福 主编 袁文伯 副主编

中国展望出版社 出版

(北京西城区太平桥大街4号)

北京华星计算机公司激光照排

北京科仪印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行

开本 850×1168 毫米 1/32 印张 10.75 字数 289 千字

1990年12月北京第1版 1990年12月第1次印刷

印数 1—1500 册

ISBN 7—5050—0418—2/N·02

定价:7.50 元

深入开展岩土力学研究和
开发利用,更好地为工程
建设服务。

许溶烈

1990年2月24日

注:许溶烈——1、中华人民共和国建设部,总工程师;
2、中国土木工程学会、中国建筑学会,副理事长;
3、建设部高级工程师、教授;
4、瑞典皇家工程科学院外籍院士。

前 言

目前，国外的岩土力学研究十分活跃，发展很快，不断取得很多新成果。我国岩土力学科学家，特别是中青年岩土力学专家，经过艰苦的努力和探索，也不断取得很多研究成果和进展。为此，我们向全国公开征文，通过审查，精选出部分优秀论文，编著成这本《岩土力学进展》。同时，在几个专业会议论文和在工程力学杂志长期积压的稿件中，也精选了若干篇优秀论文编入该书。使之尽量反映出国内岩土力学的研究进展和水平，以及国外的动态。使岩土力学尽快转化为生产力，更好地为祖国四化建设服务。

本书是一本论文集，内容比较丰富，包括岩土力学本构方程研究、岩石变形与破坏理论、围岩空间应力分析，围岩分类研究，围岩压力试验，断裂与损伤、数值分析方法（有限元、边界元）、岩土力学实验技术、喷锚支护研究、边坡稳定分析、巷道及采场支护、软弱岩体的变形控制、工程实例和模拟实验等。这些论文涉及到岩土力学的各个方面，不同程度的都有一些突破和进展。特别是在理论上，提出了一些新理论、新概念和新方法，如围岩非连续、非均质、非线性分析，非确定岩土力学，模糊数学、概率论、拓扑学、可靠性数学的应用，计算岩土力学等。同时，这也反映出一个重要问题，即我国在理论研究上与国际水平相差不太大，而在理论与实际的结合、测试手段、仪器、设备和实验方法方面，应用的广度和深度上与国外相比却相差较大。编著本书的目的就是为了尽快缩小这个差距，直至赶上和超过国际先进水平，为促进我国岩土力学发展而做一点有益的工作。

另外，由于本书侧重于岩石力学，主要收集中青年岩土力学专家的论文，受篇幅限制，未选入的论文还很多，肯定还有不少

优秀论文没有被收集，希望各作者谅解。以后，根据出版条件，我们还将编辑出版工程力学各专题论文选集、专著等，欢迎大家支持和合作。

本书在编审过程中，得到中国隧道与地下工程学会理事长刘圣化，同济大学教授孙钧，中国矿业大学教授陈至达、副教授范干勤，西南交通大学教授关宝树、清华大学教授徐秉业，重庆建工学院教授朱敬民，北京科技大学副教授陈新万，煤炭科学研究院高级工程师姚建国等同志的大力支持和帮助。陈进博士、张玉卓博士和刘日辉工程师为编辑出版这本书做了大量工作，付出了艰辛的劳动，在此一并深谢。

陈祥福
袁文伯

1988年10月于北京

目 录

前 言..... 陈祥福 袁文伯(1)

理论研究

- 岩土力学研究中的若干重要问题和展望..... 陈祥福(1)
- 岩土介质变形与破坏理论 陈 进(14)
- 岩石内变量演化的模糊随机过程 张玉卓(22)
- 边坡工程的可靠性分析 张 兴(31)
- 受压下岩石强度理论的断裂力学新探 李洪涛(41)
- 岩土结构极限承载能力的计算方法及
应用 刘文政 徐秉业(53)
- 岩石非弹性变形分析的单参数模型 谢和平(63)
- 边坡稳定性蒙特卡罗分析评述 杨 庆(72)
- 非连续岩体概率模型的研究现状 梁力群(80)

力学分析与数值计算

- 考虑围岩非均匀性的圆形洞室二次应力场的
摄动解 刘新宇(87)
- 地下圆形结构有限元二阶分析 金康宁(93)
- 岩石遇水膨胀效应的有限元分析..... 王来贵(103)
- 隧道斜交洞口段衬砌的空间受力机理
探讨..... 彭立敏 邝国能(111)
- 深埋巷道底鼓的蠕变模拟试验和数值
分析..... 潘一山 李国臻(125)

边坡工程中软弱结构面力学参数的反算分析..... 王起新(131)

喷锚支护理论及应用

锚喷支护对改善隧洞围岩岩性力学机制的研究.....	孙 钧	宋德彰(138)
锚喷支护洞室的弹塑性边界元——有限元耦合计算.....	许金余	郑颖人(150)
超前围壁锚杆支护结构的模拟试验研究.....	姜春旭	刘之洋(164)
全长粘结式锚杆的空间作用分析.....	何国杰	谢孝忠(173)
粘弹性围岩中全长粘结型锚杆杆体受力分析.....	顿志林	高家美(183)
端点及全长粘结混合锚固锚杆的受力分析.....		许立珊(190)
全长锚固锚杆的作用机理分析.....		冯永恒(202)
锚杆研究的新进展.....		张玉军(211)

围岩分类及应用

围岩分类的数量化研究.....		关宝树(221)
分级判据的可靠性分析.....	李保民	林韵梅(232)
围岩稳定性分级的工程应用.....		徐世生(241)
围岩稳定性分类及发展前景.....		杨炳健(247)

工程实例和实验研究

重庆菜袁公路双线隧道模拟研究.....	朱敬民	王国森(263)
金山店铁矿阶段自然崩落法采场地压研究.....		陈冀民(280)
钻井井壁的地区实测及测压盒与其周围介质的耦合问题.....		刘日辉(292)
用岩体综合强度方法预计导水裂缝带高度.....		申宝宏(299)
巷道底鼓成因及防治实例分析.....		陆庭侃(306)

煤层底板的采动影响特征..... 张金才(312)

围岩加固理论和技术

井巷围岩加固的基本原理..... 袁文伯 陈 进(319)

岩土力学研究中的若干重要问题和展望

陈祥福

(商业部设计院)

引 言

岩土力学在国民经济发展和工程建设中，具有举足轻重的作用。它不仅是地下工程的理论基础，而且是整个工程（包括土木、建筑、国防、冶金、采矿、水工、交通和能源工程等）的理论基础之一。岩土力学主要包括岩石力学、土力学、构造地质学和技术科学，是一门实践性很强的应用科学。它的研究必须密切结合各种工程建设和工程实例，不断从实践中抽象出共性问题，加以理论研究，反过来又应用于工程和生产中，得到检验、修改和补充，使之不断发展。

我国岩土力学研究取得很大成绩和不少成果，解决了一些大型工程中的岩土力学问题，为经济建设（特别是国防建设、能源和交通）做出了很大的贡献。国外岩土力学研究很活跃，发展迅速，不断有新成果和新突破。但是，我国的水平与国际先进水平比较相差多少年？这个差距是在增大或者缩小？我们研究面临的问题是什么？有哪些主要研究问题？研究方向如何？研究的前景如何等。这是我国岩土力学家常常思考的问题，也是我们当前面临的主要问题。本文仅就上述一些问题，主要与岩土力学进展有关的课题（侧重于岩石力学）提出一些意见和建议，供研究人员和决策部门参考。

一、我国岩土力学研究应从“备战”转到经济建设上来

以前，“备战”曾是我国的基本国策，一切工作的指针。由于国际形势的变化和世界大战爆发的可能性减少，我国已把经济建设作为中心。对于岩土力学来说，由于“备战”需要建设各种各样的国防设施、国防工厂和地下工程，促进了岩土力学的发展。现在，不仅国防地下工程和人防工程建设数量减少很多，而且要考虑如何“民用化”利用问题。因此，岩土力学的研究应迅速转到经济建设上来，使之更好地为四化建设服务。这里，注意以下几个研究方向：

1、岩土力学研究与能源开发结合

这里除了采矿、水、电、石油和天然气开采中岩土力学以外，应注意利用深岩层热能开发中的岩土力学问题。如岩石在高温、高压下的物理力学性能，超深埋地下岩洞的力学分析，原岩地应力的测定和分析等。当然，在地下核电站、水电站高坝建设中，也有很多岩土力学问题需要研究。

2、岩土力学与城市建设结合

现在全世界面临着人口膨胀、城市交通拥挤、住房困难和城市用地紧张等普遍问题。城市建设必然要尽量利用地上空间资源和地下空间资源。有效利用地上空间资源，就须大力发展高层建筑。由于高层建筑受到整体稳定性限制，必须埋入地下相当的深度（如 $1/8\sim 1/12H$ ），这就有很多岩土力学问题需要研究和解决。如地下连续墙、人工挖孔桩、岩石地基上基础的锚固、上部建筑与地基基础的共同作用、基础工程设计的可靠性等。另外，在有效利用城市地下空间资源中，经济发达国家的现代城市已逐步“走向地下”，建设了不少地下工程，如地铁、地下公用建筑、地下工厂、地下贮库和地下娱乐建筑等。我国城市地下空间利用主要是地铁、人防工程和地下室等。今后，应统一规划，要立法，合

理开发和利用地下空间。根据国外的经验和我国的国情，在城市地下工程的建设和利用中，应注意以下几项：

- (1) 地下铁道、地下过江或过海隧道、地下公路隧道；
- (2) 地下商场；
- (3) 城市过街地道；
- (4) 地下公共建筑（地下影剧院、游泳池、博物馆、展览馆、冰球场、地下会堂、图书馆、医院、停车库等）；
- (5) 地下储库（地下油库、冷库、气库、水库、粮库、物资仓库、热水库、核废物库等）；
- (6) 人防工程的改造（“民用化”），地下室的利用；
- (7) 地下住宅。

这当中，有很多新的研究课题，如地下贮气库、地下贮水库、多层地铁、多层地下住宅和平战结合的人防—民用工程等。

3、岩土力学与近海工程结合

4、岩土力学与防灾工程结合

5、岩土结构和本构关系结合

以上这些问题，都应结合具体工程项目来研究，从工程建设的经验和教训中来推进岩土力学向前发展。

二、岩石力学的主要研究进展

岩石力学的研究课题很多，进展也很快，这里仅就几个主要问题，简单介绍其国内外的进展情况。

1、计算理论和设计方法

(1) 围岩压力问题

围岩压力计算是一个古典而现在一直使用的问题。它的确定方法一直是岩土力学家研究的热点。一般采用理论计算、半理论一半经验和实测方法确定。由于影响围岩压力的因素太多，情况复杂，使理论计算围岩压力的解析值比较困难。各种公式都有很

多假定。若假定少了其适用范围就十分有限；若假定多了，其适用性较差而且十分复杂。因此，各种理论计算公式仍然属于近似估计式，离实际应用都有相当的距离。实测方法受工程条件、测试设备和科学技术的总体水平限制，还没有达到普遍应用的阶段。半理论一半经验方法也常称工程类比法，这是目前广泛采用的方法。它利用已有经验数据，作理论分析，按围岩分类来确定围岩压力的大小。目前，国内外主要的围岩分类法有六种，即：M·M·ПРОТОДЬЯКОНОВ的岩石坚固性系数分类法、K·Terzaghi分类法、中国“铁道隧道围岩分类法、中国基建人工岩石洞室围岩分类法、中国水工隧洞围岩分类法和Bierbaumer隧洞顶部围岩压力分类法。前两种国外用得很多，我国的三个分类法实质上是普氏法的发展。现在，围岩分类法研究仍然很活跃，各种改进方法很多，但其发展是应用数理统计、模糊数学和可靠性数学来分析岩体结构、岩体的物理力学性能、岩洞形状、影响围岩压力的各种因素和影响围岩稳定性的各种因素，从定性到定量进行围岩分类从而估算围岩压力。如R. Q. D. 围岩分类法、R. S. R. 参数组合围岩分类法、Barton围岩分类法等都是在丰富经验的基础上，进行大量的统计分析工作，考虑了主要的因素，从围岩评价、围岩压力估计、支护形式选择和技术要求等都提出明确的建议，有很高的实用价值。

另外，根据围岩自承力特点，考虑围岩与支护结构共同作用，围岩即是结构又是荷载，这样可应用连续介质力学的理论，求出围岩应力，根据围岩应力再求围岩压力。但是，只有少数几种情况才能求出围岩应力的解析值，目前多采用数值法求解。有的假定围岩应力与围岩压力成正比例，但很难求得系数。尽管围岩应力与围岩压力的关系式有若干设想，但与实际情况仍然有较大差别。

我国发展的“地质—力学”法，考虑了地质结构面的各种组合、岩体结构的力学特征和岩体裂隙等因素，计算非稳定岩体产

生的围岩压力。这个方法实质上是普氏理论的发展。

(2) 弹性抗力计算

地下结构计算中，考虑弹性抗力的作用，其关键是计算弹性抗力系数问题。这里需要考虑岩体的非线性、非均质和非连续性质、岩体原始应力、岩体与结构的作用条件、衬砌结构的形状和施工技术等因素。工程应用多采用简化计算和实测相结合的办法。目前，研究动向是非线性抗力的计算。

(3) 岩石断裂力学

由于金属断裂力学发展很快，已初步形成理论体系。不少科学家把这些理论应用于岩石力学的研究，发现岩石断裂力学比金属断裂力学要复杂而且具有自身的特点。目前研究比较多是岩石断裂力学与地震力学、损伤力学、地下水渗流力学、地质力学相结合，它的工程应用也还是一些初步和简单的问题。

(4) 岩体稳定性分析

我国工程中用得较多的是极限平衡分析（包括弹性、塑性理论）、地质一力学分析（如赤平投影分析、块体分析）、空间分析和数值分析（如有限元、边界元法）等。主要应结合工程实际来进行。

(5) 非确定性理论和可靠性分析

岩石力学的研究中，人们已发现很多因素都具有不确定性，如岩体的物理力学性质，裂隙的力学性质和分布，原始地应力、地下水渗流、深层岩石在高压和高温下的性质、岩体的本构关系等。因此，近年来不少科学家采用概率论、随机理论、模糊数学、可靠数学来研究一些岩石力学问题。同时，地下结构要求安全可靠，因此也应研究地下结构的可靠度和优化设计问题。

(6) 非线性岩石力学

由于岩体或岩石本来就是非线性的，既是连续的又是断裂的，加上岩体结构的各种组合，使得非线性岩石力学的发展很有限。岩体的非线性模拟，现在几乎都采用数值法，如有限元非线性分析

的无拉力分析、节理单元、离散单元、软弱夹层单元、岩体层间滑移模型和层状岩体分析，以及岩体的弹塑性、塑性和流变性分析等。一般这些非线性分析都结合具体工程进行。

(7) 设计方法

由于岩石力学的理论目前还不能解决地下工程结构的计算问题，理论与实际有较大出入。所以其设计方法大多依靠经验和实测，以及各种理论计算相结合的综合法。国际隧道协会推荐以下四种方法：工程类比法、实测为主的实用设计法、作用—反作用设计法和连续介质力学法等。目前，已发展到采用“信息化的设计方法”。

2、新奥法 (NATM)

新奥法是基于莫尔理论和岩石应力—应变特性，考虑围岩压力、围岩应变、支护结构时间和种类等因素的半理论一半经验设计施工新方法。其主要特点为：(1) 考虑了岩体的力学性能；(2) 选择支护结构的最好时机，避免围岩的不利应力应变状态；(3) 采用完整的、封闭的支护结构，考虑围岩与结构的共同作用；(4) 现场实测监控围岩动态，设计与施工结合，理论与实际结合，时间与空间结合，长期和短期结合，指导岩洞支护结构的设计与施工。新奥法具有突出优点：(1) 适用范围很广，如地铁、矿井、水工隧洞、铁路和公路隧道、地下贮库和地下工厂等；(2) 适用于各种地质条件，如坚硬岩体、软弱岩体、砂土质地层、膨胀土层，以及具有不良地质条件的岩体等；(3) 考虑围岩与支护结构的共同作用后，柔性结构受力好，节约人力和成本，减少开挖量，有效利用地下空间；(4) 施工安全，空间作业方便、永久支护，施工速度快；(5) 设计、施工、实测一体化，使设计不断修改和完善，更加可靠；(6) 便于机械化施工；(7) 岩洞的跨度亦可以达到 30 多米，埋深到 1000 多米。

由于新奥法具有以上突出优点，具有很强的生命力，现已引起全世界的重视和普遍推广应用。从理论上，它把注意力又转到

连续介质力学的研究。这样，对于完整岩体、层状岩体和软弱破碎岩体的数值分析，可以比较容易考虑岩体的弹性、弹塑性、塑性和流变性质，采用非线性力学分析；对于块体或碎块岩体，采用块体理论（如离散单元）、碎块体力学理论和损伤力学进行分析。使地下工程的理论计算显得必不可少，从而提高其设计水平。

新奥法从1964年由奥地利的L. V. Rabcewicz创立以来，才短短二十多年，还有很多理论问题需要研究，如围岩应力重分布、围岩变形和破坏规律、围岩稳定性分析、围岩与支护结构的共同作用、开挖方式、开挖后支护的手段和把握支护结构的时机、预支护方法和动力学分析、支护结构的使用寿命和可靠度、不良地质条件的处理、测试技术和设备等。

3、信息化设计—计算法

这个方法是以收敛限制法为基础，由计算或实测洞周围岩收敛位移值进行反馈和监控，进行逆分析，将其结果作初始信息，进行正演计算，这样不断修改、调整设计参数，指导地下工程的设计和施工。由于随时间变化的洞周径向收敛位移值的各种理论计算模型和方法都不完善，而且与实际量测结果都有一定的差距，所以目前都是以实测值（用实验洞或导洞）为准，进行围岩非线性反演分析计算。这样，能考虑开挖面的存在、开挖面的空间效应、开挖掘进速度的影响以及开挖面与量测面位置的间距关系等多种因素，可得到三维初应力场和岩体的主要物理—力学参数（ E 、 μ 、 C 、 φ ）以及岩体的粘性参数。这种“参数反分析技术”，借助于数值分析方法和电子计算机，使地下工程的设计与施工方法起了突破性的变革，逐步形成“信息化设计—计算法”。这里采用的数值分析方法主要是有限元法和边界元法，使计算结果比较可靠。

虽然，信息化设计法是在新奥法的基础上发展起来的，但它又不同于新奥法，比新奥法更注重围岩位移的监控和反演计算。由于岩洞周边位移是岩体物理—力学性质、地质结构、岩洞空间和时间效应等各种复杂因素的综合反映。所以，计算和实测围岩位

移，掌握位移变化规律是信息化设计法的基础。这里主要要确定围岩最大允许变位和允许变位速率，往往最大允许变位速率是设计和施工的关键参数。我国规定，当岩洞水平变位收敛率小于 $0.1\sim 0.2\text{mm}/\text{天}$ ，岩洞顶下降速率应小于 $0.07\sim 0.15\text{mm}/\text{天}$ 时，才可停止位移监测，作永久性围岩支护。

4、专家系统

目前，土木工程、建筑工程设计的专家系统已有好多种，但地下工程设计的专家系统目前还少见。由于围岩稳定性分析十分复杂和影响结构可靠度的条件太多，以及各种理论都或多或少与实际有出入。因此，地下工程的设计始终离不开经验方法。把所有专家的经验 and 知识汇集起来，应用公认的规范、规定和标准，进行模糊推理和定量分析，作出判断和决策，指导设计与施工并回答其中的疑难问题。这就成了“地下工程设计的专家系统”。目前，这种专家系统仍然处于初级阶段，还没有达到实用的程度。

5、计算岩土力学

计算力学的方法应用于岩土力学，或者计算力学与岩土力学结合可称为计算岩土力学。目前，计算岩土力学主要是进行围岩（或土层）应力分析。现在已能考虑岩体的某些非线性特性，如弹塑性、粘弹塑性、粘塑性等。同时，也能考虑断层、夹层、节理等不良地质现象。这对岩土力学发展起了促进作用。

计算岩土力学除了计算方法以外，还编制了各种用途的程序，有专用程序，也有通用程序。这些程序大都采用有限元法和边界单元法，不仅进行二维分析，还可进行三维分析。使经验法设计更具有一定的理论基础。

6、岩土动力学

岩土动力学对建筑、水利、矿业、能源、土木工程、地下工程和国防工程等都有重要的意义。

岩土动力学中的动荷载主要有：爆炸、冲击、地震、振动、地球运动、风荷载等。由于这些动荷载性质不同，使岩土动力学的