

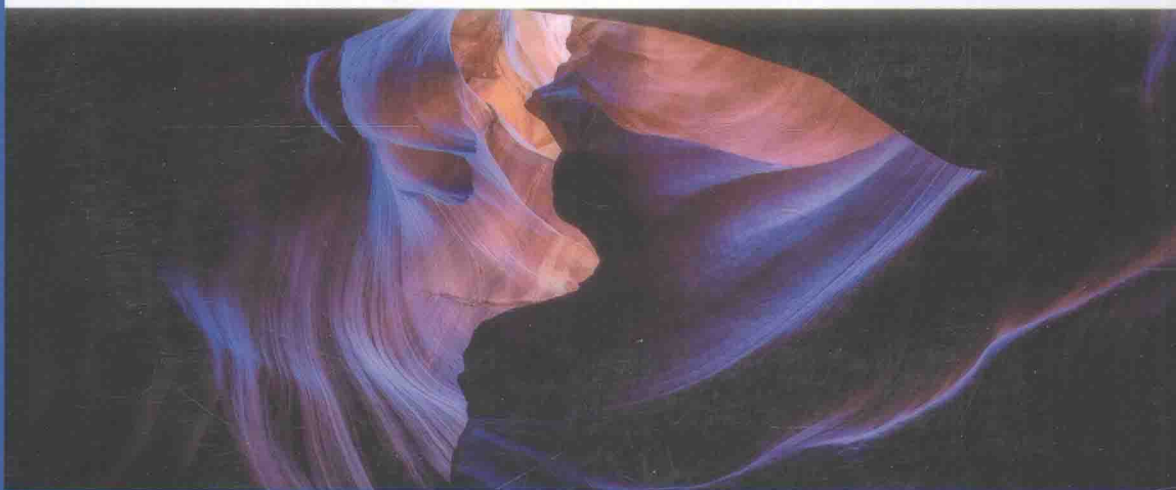


高等学校城市地下空间工程专业规划教材

岩体力学

YANTI LIXUE

张向东 马芹永◎主编



人民交通出版社股份有限公司
China Communications Press Co., Ltd.

高等学校城市地下空间工程专业规划教材

岩体力学

张向东 马芹永 主编



人民交通出版社股份有限公司
China Communications Press Co., Ltd.

内 容 提 要

本教材是高等学校城市地下空间工程专业规划教材之一,是根据教育部关于拓宽专业面、加强理论与实践教学的要求编写的。全书共六章,包括绪论,岩石的物理力学性质与强度理论,岩体的力学性质与工程分类,地应力,地下工程围岩稳定性分析,围岩压力理论与计算。各章后附有相应的思考题与练习题。

本教材可作为城市地下空间工程、道路桥梁与渡河工程、土木工程、采矿工程、水利工程、地质工程、石油工程等专业的本科生教材,也可作为高等院校、科研院所、设计单位、施工单位等的教师、科研人员和工程技术人员的参考书。

图书在版编目(CIP)数据

岩体力学 / 张向东, 马芹永主编. —北京: 人民交通出版社股份有限公司, 2017. 1

高等学校城市地下空间工程专业规划教材

ISBN 978-7-114-12934-6

I. ①岩… II. ①张… ②马… III. ①岩石力学—高等学校—教材 IV. ①TU45

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2016)第 075816 号

高等学校城市地下空间工程专业规划教材

书 名: 岩体力学

著 者: 张向东 马芹永

责任编辑: 张征宇 赵瑞琴

出版发行: 人民交通出版社股份有限公司

地 址: (100011)北京市朝阳区安定门外外馆斜街3号

网 址: <http://www.ccpres.com.cn>

销售电话: (010)59757973

总 经 销: 人民交通出版社股份有限公司发行部

经 销: 各地新华书店

印 刷: 北京鑫正大印刷有限公司

开 本: 787×1092 1/16

印 张: 13

字 数: 302 千

版 次: 2017 年 1 月 第 1 版

印 次: 2017 年 1 月 第 1 次印刷

书 号: ISBN 978-7-114-12934-6

定 价: 28.00 元

(有印刷、装订质量问题的图书由本公司负责调换)

高等学校城市地下空间工程专业规划教材

编 委 会

主任委员:张向东

副主任委员:宗 兰 黄 新 马芹永 周 勇
金 奕 齐 伟 祝方才

委 员:张 彬 赵延喜 郝 哲 彭丽云
周 斌 王 艳 叶帅华 宁宝宽
平 琦 刘振平 赵志峰 王 亮

序 言

近年来,我国城市建设以前所未有的速度加快发展,规模不断扩大,人口急剧膨胀,不同程度地出现了建设用地紧张、生存空间拥挤、交通阻塞、基础设施落后等问题,城市可持续发展问题突出。开发利用城市地下空间,不但能为市民提供创业、居住环境,同时也能提供公共服务设施,可极大地缓解城市交通、行车、购物等困难。

为适应城市地下空间工程的发展,2012年9月,教育部颁布了《普通高等学校本科专业目录》(以下简称专业目录),专业目录里将城市地下空间工程专业列为特设专业。目前国内已有数十所高校设置了城市地下空间工程专业并招生,而在这个前所未有的发展时期,城市地下空间工程专业系列教材的建设明显滞后,一些已出版的教材与学生实际需求存在较大差距,部分教材未能反映最新的规范或标准,也没有形成体系。为满足高校和社会对于城市地下空间工程专业教材的多层次要求,人民交通出版社股份有限公司组织了全国10余所高校编写“高等学校城市地下空间工程专业规划教材”,并于2013年4月召开了第一次编写工作会议,确定了教材编写的总体思路,于2014年4月召开了第二次编写工作会议,全面审定了各门教材的编写大纲。在编者和出版社的共同努力下,目前这套规划教材陆续出版。

这套教材包括《地下工程概论》《地铁与轻轨工程》《岩体力学》《地下结构设计》《基坑与边坡工程》《岩土工程勘察》《隧道工程》《地下工程施工》《地下工程监测与检测技术》《地下空间规划设计》《地下工程概预算》等11门课程,涵盖了城市地下空间工程专业的主要专业核心课程。该套教材的编写原则是“厚基础、重能力、求创新,以培养应用型人才为主”,体现出“重应用”及“加强创新能力和工程素质培养”的特色,充分考虑知识体系的完整性、准确性、正确性和适用性,强调结合新规范、增大例题、图解等内容的比例,做到通俗易懂,图文并茂。

为方便教师的教学和学生的自学,本套教材配有多媒体教学课件,课件中除教学内容外,还有施工现场录像、图片、动画等内容,以增加学生的感性认识。

反映城市地下空间工程领域的最新研究成果、最新的标准或规范,体现教材的系统性、完整性和应用性,是本套教材所力求达到的目标。在各高校及所有编审人员的共同努力下,城市地下空间工程专业系列规划教材的出版,必将为我国高等学校城市地下工程专业建设起到重要的促进作用。

高等学校城市地下空间工程专业规划教材编审委员会
人民交通出版社股份有限公司

前 言

当今世界,城市轨道交通、高速公路、高速铁路、水利水电、石油化工、采矿工程等突飞猛进,科学技术日新月异,新理论、新方法、新技术、新材料、新设备、新工艺不断涌现,新标准、新规范不断更新或推出,并应用于实践。为繁荣教育事业,推进教材建设,由人民交通出版社股份有限公司组织部分院校长期从事本课程教学的教师编写了本书。

岩体力学是高等院校城市地下空间工程、道路桥梁与渡河工程、土木工程、采矿工程、水利工程、地质工程、石油工程专业的一门专业基础课。本教材着眼于培养21世纪复合型建设人才,遵循高等学校城市地下空间工程培养方案,参考高等学校土木工程等专业指导委员会推荐的岩石力学教学大纲,在教学改革和实践的基础上,对教学内容进行了详细论证和整合,同时兼顾其他相关专业的要求,使得本教材的适应性更强。

岩体力学是一门理论性和实践性都很强的课程,在编写过程中,突出基本知识、经典理论、成熟经验、常规方法的论述,使教材体现少而精,并兼顾本学科的发展和反映国内外先进技术。基本知识、经典理论和常规方法的论述力求深入浅出,语言通俗易懂,文字简明扼要,推导过程严密。成熟经验和应用部分的编写结合现行的标准和规范,尽量以共性的内容为主,不拘于某一标准或规范的特殊内容,兼收并蓄,以使学生尽快掌握标准或规范的主要内容,有利于培养学生适应实践的能力。同时,还简要介绍了岩体力学发展简史和发展动态,为学生今后从事岩体力学与岩体工程方面的建设与研究工作打下良好的基础。在内容与次序的编排上有利于自学,所选用的符号、术语和计量单位力求前后贯穿一致,并编入一定数量的思考与练习题供学生练习。全书重点突出,深入浅出,加强了各章之间的相互衔接。

本书由辽宁工程技术大学张向东、安徽理工大学马芹永任主编。

本书编写单位及编写人员分工如下:第一章、第三章由辽宁工程技术大学张向东编写;第二章由安徽理工大学马芹永编写;第四章由黑龙江科技大学迟学海编写;第五章由南京工程学院金华编写;第六章由安徽理工大学平琦编写。

在编写过程中参考了大量文献(附后),这些参考著作、教材、论文和研究成果为本书的顺利成稿奠定了良好的基础,在此对这些文献的作者表示衷心的感谢。

限于编者的水平,书中难免有不当之处,恳请读者批评指正。

编 者
2016年10月

目 录

第一章 绪论	1
第一节 岩体力学及其研究对象	1
第二节 岩体力学的研究内容与研究方法	2
第三节 岩体力学发展简史与动态	5
思考与练习题	11
第二章 岩石的物理力学性质与强度理论	12
第一节 概述	12
第二节 岩石的物理性质	12
第三节 岩石的力学性质	23
第四节 岩石的强度理论	56
思考与练习题	65
第三章 岩体的力学性质与工程分类	68
第一节 概述	68
第二节 岩体结构的基本类型	68
第三节 结构面的特性	70
第四节 岩体的力学性质	87
第五节 岩体的工程分类	97
思考与练习题	105
第四章 地应力	108
第一节 概述	108
第二节 自重应力场	108
第三节 构造应力场	110
第四节 地应力实测及地壳浅部地应力变化规律	112
思考与练习题	123
第五章 地下工程围岩稳定性分析	125
第一节 概述	125
第二节 地下工程围岩的弹性应力状态	126
第三节 地下工程围岩的弹塑性应力状态	146
第四节 地下工程围岩的位移	153
第五节 地下工程围岩稳定性判别	159
思考与练习题	163
第六章 围岩压力理论与计算	165
第一节 概述	165
第二节 围岩压力分类	165

第三节 围岩与支护共同作用分析·····	168
第四节 围岩压力的计算理论与方法·····	173
思考与练习题·····	191
参考文献·····	193

第一章 绪 论

第一节 岩体力学及其研究对象

一、岩体力学的定义

岩体力学(Rockmass Mechanics),又称岩石力学(Rock Mechanics),属于力学的一个分支。岩体力学是研究岩石与岩体在外界因素(如荷载、水、温度变化等)作用下的应力、变形、破坏、稳定性及加固的学科。

关于岩体(石)力学的定义很多,目前仍不能统一,偏重不同行业应用的岩石力学往往有不同的定义。

1964年,美国地质协会岩石力学委员会提出的岩石力学定义为:“岩石力学是研究岩石的力学性状的一门理论和应用科学,它是力学的一个分支,是研究岩石在不同物理环境的力场中产生各种力学效应的学科。”

陈宗基院士对岩石力学曾作过如下定义:“岩石力学是研究岩石过去的历史、现在的状况、将来的行为的一门应用性很强的学科。”过去的历史是指岩石的地质成因和演变,包括地应力场的变化;现在的状况是工程建造前和建造过程中对岩石性状改造前后的认识;将来的行为是预测工程建成以后可能发生的变化,以便研究预防和加固措施。

在岩石力学名词解释全集中给出如下定义:“岩体力学是力学的分支学科,是研究岩体在各种力场作用下变形与破坏规律的理论及其实际应用的学科,是一门应用性学科。”

上面介绍了几种典型的岩体(石)力学定义,虽然有所不同,但可以归纳为:

(1)是力学的一个分支。

(2)是研究岩石与岩体物理力学性质,强度、变形与破坏规律,以及岩体工程稳定性的学科。

(3)是一门应用性学科。

应特别指出的是:随着科学技术的发展,岩石与岩体已有严格区分,准确地说本学科称为岩体力学更为符合这一学科的研究主题。但是,岩石力学这一名词沿用已久且使用普遍,所以可以认为岩体力学与岩石力学是同一概念。

二、岩体力学的研究对象

首先介绍几个概念。

(1)岩石:是一种或多种矿物组成的集合体,是构成地壳和上地幔的物质基础。

(2)矿物:是指存在于地壳中的具有一定化学成分和物理性质的自然元素和化合物。其中,构成岩石的矿物称为造岩矿物,如石英、正长石、方解石等。



(3) 岩体:在地质历史过程中形成,由岩石单元体和结构面组成,具有一定的结构并赋存一定天然应力状态和地下水等,是地质环境中的地质体。

(4) 结构面:地质历史发展过程中,在岩体内形成的具有一定的延伸方向和长度,厚度相对较小的地质界面或带,亦称弱面。

(5) 岩块:是指不含显著结构面的岩石块体,是构成岩体的最小岩石单元体,亦称结构体。

从上述定义可知,岩体是指一定工程范围(3~5倍以上工程尺寸)内的自然地质体,含有结构面(弱面)和岩块(结构体)。岩石是一种基于材料的概念,通常所说的岩石是指岩块。岩体力学的研究对象就是工程范围内的岩体,而岩体包括结构面和岩块,所以岩体力学的研究对象是大范围的岩体、小尺寸的岩块(岩石)和结构面。

岩体力学服务的工程领域十分广泛,如地下工程、采矿工程、土木工程、铁道工程、公路工程、水利水电工程、国防工程、海洋工程、核废料储存以及地震地质学、地球物理学和构造地质学等地质学科。岩体力学是上述工程领域的理论基础之一,同时上述工程领域的岩体力学实践促进了岩体力学的诞生和快速发展。

第二节 岩体力学的研究内容与研究方法

岩体力学服务的对象非常广泛,它涉及国民经济的许多领域及地学基础理论研究领域。不同的服务对象,对岩体力学的要求不尽相同,其研究的内容也有所不同。岩体力学的研究对象,不是一般的人工材料,而是在天然地质作用下形成的地质体。对于这样一种复杂的介质,不仅研究内容非常复杂,而且其研究方法和手段也应与连续介质力学有所不同。

一、岩体力学的研究内容

岩石力学服务对象的广泛性和研究对象的复杂性,决定了岩石力学研究的内容也必然是广泛而复杂的。从工程观点出发,大致可归纳为如下几方面的内容。

1. 岩石和岩体地质特征的研究

岩石与岩体的许多性质,都是在其形成的地质历史过程中形成的。因此,岩石与岩体地质特征的研究是岩体力学分析的前提。主要研究内容包括:

- (1) 岩石的成因、矿物成分与(微)结构特征。
- (2) 结构面的赋存状态与类型。
- (3) 岩体结构类型及其力学特征。
- (4) 岩体(石)地质分类等。

2. 岩石和岩体物理力学性质的研究

这是岩体力学基础性研究工作,通过室内和现场试验获取岩石与岩体的各项物理力学性质,并以此作为评价岩体工程稳定性最重要的依据。主要研究内容包括:

- (1) 岩石的物理、水理与热学性质及其室内试验与测试技术。
- (2) 岩块强度与变形特性及其室内试验与测试技术。

- (3) 结构面强度与变形特性及其室内试验与现场原位测试技术。
- (4) 岩体强度与变形特性及其现场原位测试技术。
- (5) 岩体中地下水的赋存、运移规律及对岩体的影响。
- (6) 岩石与岩体的动力特性等。

3. 岩石和岩体本构关系、强度与变形理论的研究

岩石和岩体种类多,物理力学性质差别大,各类岩石和岩体的力学响应不同,所以,岩石和岩体的本构关系、强度与变形理论的研究一直是本学科的重点。主要研究内容包括:

(1) 岩石(岩块)在各种应力状态下的变形规律,本构关系(应力—应变关系)与强度理论的建立。

(2) 结构面在法向压应力及剪应力作用下的变形规律,结构面抗剪强度与变形理论的建立。

- (3) 工程岩体本构关系、破坏机理与强度理论。

4. 岩体中原岩应力分布规律及其量测方法的研究

在岩体中存在天然应力,即原岩应力,亦称地应力,是工程岩体发生变形与破坏的力的根源。主要研究内容包括:

- (1) 原岩应力计算理论与方法。
- (2) 原岩应力实测技术等。

5. 工程岩体稳定性研究

地下工程围岩、边坡岩体、地基岩体等工程岩体的稳定性研究,是岩体力学实际应用方面的研究。主要研究内容包括:

- (1) 各类工程岩体中重分布应力的大小及分布规律。
- (2) 各类工程岩体在重分布应力作用下的变形计算方法。
- (3) 各类工程岩体的稳定性分析与评价方法等。

6. 工程岩体加固技术与设计方法的研究

工程岩体自身强度、抗变形能力、地基承载力等一般不能满足稳定性的要求,如地下工程的冒顶、边坡的失稳、地基的剪切破坏等。这就需要进行加固处理,如地下工程围岩加固与支护、岩石边坡加固与维护、岩石地基加固处理等,这是岩体力学成为应用性很强学科的重要体现。主要研究内容包括:

(1) 地下工程围岩压力计算理论、支护技术及设计方法、围岩加固技术、围岩变形控制理论与方法。

- (2) 岩石边坡稳定性分析方法、加固技术及设计方法。

- (3) 软弱、破碎岩体地基加固处理技术及地基承载力的确定方法等。

7. 工程岩体的模型模拟试验及原位监测技术的研究

模型模拟试验包括数值模型模拟、物理模型模拟和离心模型模拟试验等,这是解决岩体力学理论和实际问题的一种重要手段。原位监测既可以检验岩体变形与稳定性分析成果的正确与否,同时也可及时地发现问题,实现信息化设计与施工。主要研究内容包括:



- (1) 岩体力学数值计算方法,如有限元法、边界元法、离散元法、有限差分法等。
- (2) 物理模型模拟主要有相似材料模拟、光弹模型等。
- (3) 离心模型模拟试验设计与成果应用。
- (4) 现场测试岩体应力、位移、松动圈等的技术与设备。

8. 各种新技术、新方法与新理论在岩体力学中的应用研究

岩体力学是通过不断引进和吸收相关学科的最新成果而不断发展起来的,近些年来,许多新技术、新方法与新理论在岩体力学中得到应用。主要包括:

- (1) 岩体的超前地质预报技术与装备。
- (2) 室内与现场真三轴强度试验与蠕变试验。
- (3) 现场无损检测技术与装备,以及岩体工程遥感测试技术。
- (4) 非线性科学理论,如耗散结构论、协同论、分形几何、分叉和混沌理论、突变理论等在岩体工程中的应用。
- (5) 岩体工程不确定性理论研究,如模糊数学、灰色理论、人工智能在岩体工程中的应用。
- (6) 岩体工程稳定性分析中的系统论研究等。

需要特别指出的是,随着岩体力学的快速发展和学科之间的交叉与渗透,岩体力学的研究内容已远不止上述8个方面,而是更加深入和广泛。

岩体(石)力学是一个大的学科门类,由于岩石力学学科快速发展,目前其分支有岩体工程地质力学、岩体结构力学、实验岩石力学、计算岩体力学、岩石流变力学、岩石损伤力学、岩石断裂力学、卸荷岩体力学、岩石动力学、智能岩石力学、分形岩石力学等。

二、岩体力学的研究方法

岩体力学的研究内容决定了在岩体力学研究中必须采用如下几种研究方法。

1. 工程地质研究法

目的是研究岩块和岩体的地质与结构特征,为岩体力学的进一步研究提供地质模型和地质资料。如用岩矿鉴定方法,了解岩体的岩石类型、矿物组成及结构构造特征;用地层学方法、构造地质学方法及工程勘察方法等,了解岩体的成因、空间分布及岩体中各种结构面的发育情况;用水文地质学方法了解赋存于岩体中地下水的形成与运移规律等。

2. 试验与测试法

科学试验与测试是岩体力学研究中非常重要的方法,是岩体力学发展的基础,包括岩块力学性质的室内实验、岩体力学性质的原位试验、原岩应力量测、模型模拟试验及原位岩体监测等方面。其目的主要是为岩体变形和稳定性分析计算提供必要的物理力学参数。同时,还可以用某些试验成果(如模拟试验及原位监测成果等)直接评价岩体的变形和稳定性,以及探讨某些岩体力学理论问题。因此,应当高度重视并大力开展岩体力学试验研究。

3. 数学与力学分析法

数学与力学分析是岩体力学研究中的一个重要环节。它是通过建立岩体力学模型和利用适当的分析方法,预测岩体在各种力场作用下的变形与稳定性,为设计和施工提供定量依据。

其中,建立符合实际的力学模型和选择适当的分析方法是数学、力学分析中的关键。目前,常用的力学模型有:刚体力学模型、弹性及弹塑性力学模型、流变力学模型、断裂力学模型和损伤力学模型等。常用的分析方法有:块体极限平衡法,有限元、边界元和离散元法,模糊数学和概率分析法等。近年来,随着科学技术的发展,还出现了用系统论、信息论、人工智能、专家系统、灰色系统、分形理论等新方法来解决岩体力学问题。

4. 综合分析法

岩体工程非常复杂,特别是对于大型岩体工程,影响因素多,地质情况复杂多变,采用单一方法很难解决实际工程问题。所谓综合分析法,就是结合上述三种研究方法,针对上述研究成果进行综合分析和综合评价,同时结合工程经验和工程类比的方法,得到符合实际情况的正确结论。

第三节 岩体力学发展简史与动态

一、岩体力学发展简史

岩体力学是伴随着采矿、土木、水利、交通、军事等领域内岩体工程的建设 and 数学、力学等相关学科的进步而逐步发展形成的一门学科,主要分以下4个时期。

1. 经验时期

在19世纪末以前,人类已经接触到一些岩体(石)工程问题,但仅限于浅部岩体。由于工程建设规模小,人们只凭实践经验解决实际岩体工程问题,没有与力学相联系。

2. 萌芽时期

19世纪末—20世纪30年代,人们开始用材料力学和结构力学方法分析岩体力学问题。例如,普罗多吉雅可诺夫(М. М. Протождьяконов)的自然平衡拱学说利用了结构力学中压力轴线理论,并建立了计算地压的普氏理论;随后,太沙基也按自然平衡拱学说建立了太沙基地压理论;斯列萨列夫(В. А. Слесарев)的极限跨度理论采用了材料力学中梁和板的计算公式等。这些理论把支护、围岩和原岩体三者人为地割裂开来。在这些理论的指导下,支护结构仅限于采用支架(木支架、金属支架等)来消极地支撑地压。1912年,海姆(A. Heim)提出了计算原岩应力的静水压力理论。

3. 形成时期

从20世纪30年代起,弹性力学、塑性力学和流变力学先后发展起来,并被引入到岩体力学领域,确定了一些经典计算公式,如金尼克(А. Н. Динник)按弹性力学理论确定的原岩应力计算公式;萨文(Р. Н. Савин)用弹性力学解析解来计算地下工程围岩应力分布与变形问题;20世纪50年代,芬纳(R. Fenner)、塔罗勃(J. Talobre)和卡斯特纳(H. Kastner)按弹塑性理论,采用不同模型建立了计算围岩应力场和位移场的计算公式;塞拉塔(S. Serata)按流变力学理论,采用流变模型对圆形地下工程围岩进行了弹黏性分析等。同时,考虑围岩与支护相互作用



而建立了围岩与支护共同作用原理。在支护措施上也摆脱了支架消极支撑地压的做法,采用能充分发挥围岩自承能力的光爆锚喷支护技术、可缩性支护、二次支护等。

1951年,缪勒(L. Müller)和斯体尼(J. Stini)开创了地质力学理论。该理论反对把岩体当作连续介质简单地利用固体力学原理进行岩体力学特性分析。强调要重视对岩体节理、裂隙的研究,重视结构面对岩体工程稳定性的影响和控制作用。主张通过现场(原位)力学试验,以便有效地获取岩体的真实力学性能,从而形成了“奥地利学派”。这个学派创立了新奥地利隧道掘进法(新奥法),促进了岩体力学的发展。

1934年秦巴列维奇(П. М. Цимбаревич)、1948年斯列萨列夫(Слесалев)和1957年塔罗勃(J. Talobre)先后出版了《岩石力学》专著,标志着岩石力学成为一门独立学科。随后,一些大学里开始开设这门课程。

4. 发展时期

从20世纪60年代起,地下采矿的深度逐渐增加,第二次世界大战(1939—1945年)后世界各国开始大量修建地下军事岩体工程,为土木、水利、交通等服务的地下洞室或隧道的数量和规模也大大增加,遇到的工程地质条件更为复杂,这就要求人们采用更为复杂和多种多样的力学模型来分析实际的岩体力学问题。这一时期内形成的力学新分支为之提供了条件,包括损伤力学、断裂力学、非连续介质力学、复合材料力学等。

在采用围岩与支护共同作用理论解决实际问题时,必须以原岩应力(即地应力)作为前提条件进行理论分析,才能把围岩和支护的共同变形与支护的作用力、支护设置时间、支护刚度等关系正确联系起来,这就促进了地应力测量工作的开展。现代实验与监测技术、电子计算机等技术的大量引入,使岩体力学研究领域取得了突飞猛进的发展。

20世纪80年代,数值计算方法发展很快,有限元、边界元及其混合模型得到广泛应用,离散单元法、有限差分法等也相继问世,并开发了多种相应的计算机软件。

20世纪90年代,岩体工程三维信息系统、人工智能、神经网络、专家系统、工程决策支持系统等迅速发展起来,并得到普遍的重视和应用。系统科学虽然早已受到岩体力学界的注意,但直到20世纪90年代才成为共识,并进入岩石力学理论研究和工程应用阶段。

进入21世纪,现代数理科学(如分形、分叉和混沌理论)、现代信息技术、现代实验与监测技术、遥感技术等的最新成果引入了岩体力学,而现代电子计算机的高性能为数值方法、模糊数学、灰色理论、人工智能、系统科学理论、非线性理论等在岩体力学与工程中的应用提供了可能。

国际岩石力学学会(International Society for Rock Mechanics, ISRM)于1962年成立,缪勒(L. Müller)担任第一任主席,这是岩体力学发展史上的大事,加强了国与国之间的学术交流,在一定程度上推动了岩体力学研究的深入开展。1985年,我国成立了中国岩石力学与工程学会(Chinese Society for Rock Mechanics and Engineering, CSRME,全国性一级学会,对外称为国际岩石力学学会中国国家小组)。在学会历届理事长陈宗基、潘家铮、孙钧、王思敬、钱七虎等院士的努力推动下,我国岩体力学学术交流、科研合作、互访等工作得到了很大发展。我国的水利水电、煤炭、铁道、建筑、冶金等部门也根据行业特点,建立了各自的岩石力学专业委员会,并对若干重大工程项目开展了广泛的科技咨询和技术支持。2011年10月,第十二届国际岩

石力学大会 (ISRM2011) 在北京国家会议中心隆重开幕, 中国科学院武汉岩土力学研究所冯夏庭研究员出任国际岩石力学学会主席, 这是我国岩体力学发展水平受到国际认可的重要标志。

二、我国岩体力学取得的主要成果

我国许多高校和科研单位有一大批教授、专家和学者, 为解决国家重大项目, 如三峡、葛洲坝、小浪底、二滩、南水北调等水利水电工程, 大冶、攀枝花、金川等矿山工程, 成昆、南昆、京九、青藏等铁路工程, 抚顺、大同、两淮、兖州等煤矿工程, 大庆、胜利、克拉玛依等石油工程, 秦山、大亚湾、岭澳等核电工程, 北京、上海、广州、深圳等地铁工程, 以及成千上万个中、小型工程建设中所遇到的岩体力学难题, 开展了大量的研究工作, 取得了一系列重大成果。

陈宗基院士把流变力学引入岩体力学, 在分析岩体流变、扩容与长期强度等概念的基础上, 提出了岩石流变扩容理论。

潘家铮院士运用各种力学理论解决岩体工程实际设计问题, 对许多复杂的结构如地下结构、地基梁与框架、土石坝的心墙斜墙、调压井衬砌等, 应用结构理论、弹性理论或板壳理论以及特殊函数, 提出了工程实用计算理论与方法。

孙钧院士开拓并发展了一门新的学科分支——地下结构工程力学, 并对地下结构黏弹塑性理论以及弹黏性节理岩体的蠕变损伤断裂效应进行了系统深入的研究, 提出了新的岩体蠕变损伤模型。

王思敬院士在创建工程地质力学、发展岩体结构理论等方面作出了重大贡献, 在工程岩体变形破坏机制研究的基础上, 发展了岩体工程稳定性分析原理和方法。

钱七虎院士将运筹学应用于防护工程的破坏概率确定、抗力论证及方案比较, 开创了我国国防与人防工程的软科学研究, 建立了我国三自由度防护结构概率设计理论。

宋振骥院士建立并完善了以岩层运动为中心的矿山压力理论和研究方法体系, 把采场矿山压力研究从定性推向定量, 把煤矿现场矿山压力和岩层控制从过去主要依靠统计经验决策推进到针对具体煤层条件定量分析的发展阶段。

王梦恕院士首次系统地完成了地下工程超前支护稳定工作面支护体系的理论分析和应用, 创造了新型网构钢拱架支护形式并广泛应用于地下工程。

葛修润院士是我国在岩土工程方面最早引入有限元法的学者之一, 相继开展了离散元法、不连续变形分析方法、流形元法、无网格迦辽金法和静态 FLAC 方法等新型数值分析方法的研究, 并开发了相应的计算软件。主持研制的 RMT 伺服控制岩石力学多功能试验机系统“在总体性能上达国际领先”(1993 年中科院院级鉴定意见)。主持研制的钻孔全景数字摄像系统在国内居领先地位。

钱鸣高院士创立了以采场上覆岩层活动规律和支架—围岩系统控制为一体的实用工程理论体系, 开发完成集矿山压力预测、控制和监测为一体的实用工程技术。

刘宝琛院士创建了时空统一随机介质理论, 提出了裂隙岩石通用力学模型, 形成了独树一帜的开采影响下地表移动及变形计算方法, 并开发了系列计算软件。

谢和平院士建立了矿山裂隙岩体宏观损伤力学模型, 开拓了矿山裂隙岩体损伤力学研究新领域, 成功预测了采动围岩的损伤大变形和蠕变稳定过程, 并应用于深部巷道大变形预测、蠕变分析及其相关的巷道支护设计等重要工程领域; 创造性地引入分形方法对裂隙岩体进行



非连续变形、强度和断裂破坏的研究,形成了矿山裂隙岩体非连续行为分形研究的新方向,并与损伤力学相结合,在岩爆、地表沉陷、顶煤破碎块度控制等重要矿山工程应用中获得成功。

顾金才院士提出了喷锚支护坑道抗动载设计计算新方法,对预应力锚索加固机理提出了弹性支撑点理论。

郑颖人院士发展了应变空间塑性理论与多重屈服面理论,在建立广义塑性理论上取得重大进展。

陈祖煜院士完善了以极限平衡为基础的边坡稳定分析理论,得出了边坡稳定分析上限解的微分方程以及相应的解析解,并将有关理论和方法推广到三维问题求解,使边坡三维稳定分析成为现实可行。

何满潮院士提出了软岩“缓变型”和“突变型”大变形灾害的概念及分类,揭示了井下高温高湿环境引起软岩软化大变形、强度衰减以及吸附瓦斯逸出的规律,提出了恒定支护阻力下有效控制矿山工程岩体大变形灾害的恒阻大变形支护理念,研发了具有负泊松比效应的恒阻大变形锚杆(索)新材料,建立了恒阻大变形支护材料结构力学模型,提出了“预留变形量的恒阻大变形锚杆高预应力支护”新方法。

潘一山教授长期从事岩石动力学研究,建立了冲击地压失稳理论、煤和瓦斯突出失稳理论及冲击地压和突出的统一理论,提出了岩体失稳破坏相似模拟理论,研制了相似材料及实验设备,发现了冲击地压启动后煤岩变形破坏过程的局部化规律,并建立了煤岩变形破坏的局部化理论。

冯夏庭研究员提出了“智能岩石力学”和“动态施工力学”等新的学科方向,并研制了相应的实验设备,推动了岩体力学学科的发展。

岩体力学是一门仍处于发展中的学科。随着经济建设的发展,岩体工程的规模不断增大、开挖与维护的难度也相应增大,新的岩体力学问题也会接踵而来。为了适应岩体工程的发展,更好地解决岩体工程建设中的难题,岩体力学中的新理论、新方法、新技术还会不断涌现。同时,对已提出的理论和方法还要在实践中进行检验、修正和完善。

三、岩体力学发展趋势

随着科学技术的飞速发展,各门学科都将以更快的速度向前发展,岩体力学也不例外。一方面,要加强岩体力学的试验与测试技术、力学分析与计算方法和工程应用的研究;另一方面,要加强学科协同合作,相互渗透,不断引入相关学科的新思想、新理论和新方法,这是加速岩体力学发展的必要途径。

下面从岩体力学理论研究、方法研究、试验与测试技术研究,以及应用研究四个大的方面简要介绍岩体力学的发展趋势。

1. 岩体力学理论研究

1) 土的本构模型的研究

国内外学者已发展了数十个岩体本构模型,但还没有一个得到工程界的普遍认可,试图建立能适用于各类岩体工程的理想本构模型是不可能的。所以,开展岩体本构模型研究应从两个方向努力:一是针对具体工程建立用于解决实际岩体工程问题的实用模型;二是建立能进一

步反映某些岩体应力应变特性的理论模型。

2) 非线性科学在岩体工程领域中的应用研究

本质上讲,许多岩体工程问题都是非线性问题。现代数理科学的耗散结构论、协同论、分形几何、分叉和混沌理论,以及突变理论、人工智能等,将用于认识和解释岩体力学的各种复杂过程。

3) 岩体工程中的不确定性理论研究

由于岩体结构及其赋存状态、赋存条件的复杂性和多变性,以及环境影响下的易变性,致使岩体工程存在大量的不确定性。现代科学技术手段如模糊数学、灰色理论、非线性理论和人工智能等为不确定性研究提供了必要的手段。

4) 岩体工程稳定性分析中的系统论研究

系统论强调复杂事物的层次性、多因素性及相互关联和相互作用的特征,应将岩体工程稳定性问题当作一种系统工程来解决。

2. 岩体力学方法研究

1) 信息综合集成方法

信息综合集成方法是以岩体力学、工程地质和系统科学相结合为中心的岩体工程信息综合集成方法,以及相应配套技术研究。

2) 新的数值方法

随着电子计算机科学的迅猛发展,作为岩体工程计算分析重要手段的数值方法,其进展必将神速。功能越来越强大的数值计算软件和新的数值计算方法将不断涌现,包括有限元法、有限差分法、离散单元法、拉格朗日元法、流形元法、无网格法、不连续变形分析方法、半解析元法、极限数值方法、概率数值方法、遗传算法、蚁群算法、细胞发生器算法、模拟退火算法、岩土工程反分析等。

3) 岩体力学统计方法

由于岩体力学性质的非均质性、不连续性和各向异性,岩体力学统计方法在解决复杂岩体工程稳定性评价方面的研究将得到重视。

4) 岩体结构精细描述和力学精细分析方法

目前,有限单元法、有限差分法、离散元法等先进的数值模拟技术在解决岩体力学问题时遇到的困难之一是计算模型与实际有偏差,因此如何精细化描述岩体真实结构是亟待研究的问题。另外,采用力学精细分析方法解决岩体力学重大问题的方法也急需解决。

3. 岩体力学试验与测试技术研究

1) 岩体工程中的地质勘察新技术

随着电子技术的发展,岩体力学所依赖的工程地质勘察技术将有长足进步,各种宏观尺度、细观尺度和微观尺度的多功能勘测技术将逐步提出,为岩体力学研究及岩体工程服务。比如,需要研制一种高性能的遥感式仪器,不仅能测到地表或地表附近的地质结构并判断岩土介质的力学性能,而且还可感应到地表以下相当深度的地下地质结构并提供相应的岩体力学参数。

2) 地应力测试新技术

地应力是一切岩体工程分析计算的基础数据,最可靠的办法是通过现场实测。地应力的