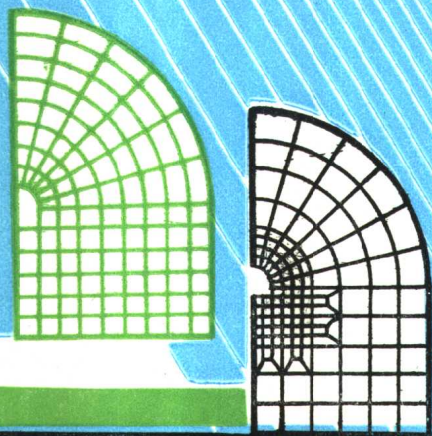


缪协兴 陈智纯 著

软岩力学

Soft Rock Mechanics



中国矿业大学出版社

软岩力学

缪协兴 陈智纯 著



中国矿业大学出版社

内 容 简 介

本书在有限变形力学的基础上,建立了解决软岩工程中围岩流变大变形和遇水软化、膨胀等重大难题的软岩力学基础。内容包括:有限变形力学理论基础;软岩力学试验方法;软岩大变形本构方程;湿度应力场理论;有限变形数值计算方法;软岩工程围岩稳定性控制等。

该书可作为岩石力学、岩土工程和工程力学等专业的研究生和高年级本科生的教学参考书,也可供矿山、交通、水利、国防和土木建筑等各专业的研究人员参考。

软 岩 力 学

缪协兴 陈智纯 著

责任编辑 朱明华

中国矿业大学出版社出版发行

新华书店经销 中国矿业大学印刷厂印刷

开本 850×1168 毫米 1/32 印张 7.75 字数 192 千字

1995 年 6 月第一版 1995 年 6 月第一次印刷

印数 1—1000 册

ISBN 7 - 81040 - 420 - 2

O · 26

定价:9.80 元

前 言

自从牛顿 1686 年开创用数学手段建立哲学基础(Philosophiae Naturalis Principia Mathematica)至今,已有 300 多年的历史了。在这期间,力学产生了许多分支,原有的力学体系在不断完善,新的力学分支也在不断建立。这是一个科学发展和提高的过程。

岩石力学的发展是与人类生产活动紧密相联的。在原始社会,人类就利用岩石作为工具和武器,进而人们又利用岩石作为建筑材料,从事各种采矿活动。但是,作为一门力学分支,必须建立在较完备的物理和数学基础之上。岩石力学作为一门独立学科只是在最近 30 年才建立起来的^[1],由于岩土工程的迅猛发展,岩石力学学科的理论还远远不能适应工程建设的需要。

目前,世界上最高的人工大坝已达 300m,最深的地下工程开挖深度也超过了 3000m,而且越来越多的工程正在(或将要)修建在软弱岩体(包括膨胀岩体)上或在这类岩体中。针对软弱岩体(包括高地应力岩体)的特点,必须深入开展一系列与之相应的物性关系、遇水作用、计算方法、支护技术等方面的研究工作,从而建立起新的学科分支——软岩力学。

作者在从事多年有关有限变形力学、软岩特性和软岩工程等研究的基础上,吸收了有关力学、采矿、建筑、地质、水利、机械等学科的最新科技成果,写成了本书。由于水平和时间所限,书中难免有错误和不足之处,欢迎读者批评指正。

本书的写作和出版得到了陈至达教授和钱鸣高教授的鼓励、指导和资助,在此表示衷心的感谢。

此外,有关软岩力学课题的研究和本书的出版,得到了国家自然科学基金、中国博士后科学基金及煤炭科学基金的资助,这里,向有关基金会表示诚挚的谢意。

作 者

1995 年 5 月

目 录

前 言	(1)
绪 论	(1)
第一章 软岩工程概况	(4)
§ 1.1 软岩工程的地质特征	(4)
§ 1.2 软岩的定义	(7)
§ 1.3 膨胀岩的成因与属性	(11)
§ 1.4 软岩的工程分类	(20)
§ 1.5 软岩工程围岩破坏规律	(29)
第二章 软岩力学特性与试验	(34)
§ 2.1 软岩基本力学性质	(34)
§ 2.2 软岩膨胀试验	(40)
§ 2.3 软岩细观力学试验分析	(45)
§ 2.4 软岩分级加载蠕变试验	(49)
§ 2.5 软岩流变大变形模拟试验	(56)
第三章 有限变形力学理论简介	(62)
§ 3.1 有限变形理论概况	(62)
§ 3.2 拖带坐标系	(63)
§ 3.3 S—R 分解定理	(65)

§ 3.4	S—R 分解定理的客观性	(67)
§ 3.5	拖带坐标系中的运动方程	(68)
§ 3.6	小变形理论的近似性	(71)
第四章	软岩大变形物性方程	(80)
§ 4.1	岩石材料的物性方程概述	(80)
§ 4.2	热力学原理与弹塑性增量方程	(89)
§ 4.3	软岩大变形物性方程	(96)
§ 4.4	软岩流变大变形物性方程	(98)
§ 4.5	软岩蠕变和松弛函数	(99)
§ 4.6	软岩流变参数的确定	(102)
第五章	湿度应力场理论	(104)
§ 5.1	湿度应力场理论概述	(104)
§ 5.2	水在岩体中的扩散	(112)
§ 5.3	湿度应力场理论的耦合方程	(116)
§ 5.4	圆形硐室的遇水作用	(119)
§ 5.5	沥青路面的扭曲	(125)
第六章	大变形问题的有限元计算方法	(127)
§ 6.1	岩土工程中的数值分析方法	(127)
§ 6.2	有限变形问题的数值计算方法	(128)
§ 6.3	更新拖带坐标法	(129)
§ 6.4	非线性大变形问题的算例	(138)
第七章	软岩巷道大变形有限元分析	(151)
§ 7.1	软岩流变非线性模式	(151)
§ 7.2	软岩流变大变形运动方程的求解	(153)

§ 7.3	软岩巷道流变大变形有限元数值模拟	(154)
§ 7.4	湿度应力场理论的有限元分析	(165)
第八章	软岩工程围岩稳定性控制	(170)
§ 8.1	软岩工程中的支护技术	(170)
§ 8.2	新奥法	(186)
§ 8.3	软岩巷道的底臃	(194)
§ 8.4	软岩巷道底臃的防治	(196)
§ 8.5	理论分析用于指导软岩支护	(200)
附 录	泥质膨胀岩室内试验的建议方法	(202)
参考文献		(220)

绪 论

目前,要给软岩下一个确切的定义是十分困难的,尤其是给出其一些定量性的指标就更为困难。总结各种软岩工程的特点,所谓软岩,应包含三个方面的概念:一是岩体的结构和所处的环境,其表现为软弱、破碎、松散、高地应力等;二是岩体的物理(化学)和力学特性,其表现为低强度、流变、风化、膨胀等;三是围岩的工程特征,其表现为:长期流变、变形量大、来压迅速等,即所谓的“难支护”。

随着软岩工程的迅速发展,其围岩稳定性控制问题越来越突出,已成为目前岩土工程方面举世公认的难题。已有的岩石力学理论很难解决这类问题,必须突破现有岩石力学学科的框架,建立新的岩石力学分支——软岩力学。根据软岩工程中围岩流变变形量大的特点,需采用有限变形理论作为软岩力学的力学基础。X. D. Pan(1989)^[2]指出:“在目前,岩石力学中大变形理论是一个开拓性的领域。”软岩力学基础的建立,无论在工程上还是在理论上都具有十分重要的意义。

近 10 多年来,软岩工程支护技术和理论的专门性研究工作越来越受到学术界的重视,国际性的学术活动日益频繁。1981 年 9 月,在日本召开了“国际软岩学术讨论会”;1986 年 6 月,国际岩石力学学会地层局在原苏联召开了“深部矿井地层控制”国际学术会议;1989 年 8 月,在法国召开了“深部围岩岩石学与岩石物理学”

学术讨论会;1990年9月,在英国召开了“软岩工程地质”国际学术讨论会;1992年7月,在澳大利亚召开了“采矿地层控制”国际学术会议。全国性的和行业性的软岩学术或攻关会议也日益增多,特别是对于煤炭系统来说,软岩巷道支护技术被列为我国岩石力学发展战略的首要任务之一。近年来,在软岩矿物成分和物理力学性质以及有关软岩工程支护方面的研究工作取得了较丰硕的成果。与此同时,有限变形力学理论也在不断发展,为建立软岩力学这门新的岩石力学分支打下了良好的基础。软岩力学的总体框架包含如下几个部分:

(1) 软岩力学的理论分析方法。鉴于软岩工程中围岩流变变形大的特点,软岩力学的理论分析方法必须建立在有限变形力学基础之上,即采用非线性大变形力学理论来分析软岩流变大的变形问题。

有限变形力学属于有理力学^[3](Rational Mechanics)范畴。关于经典力学基础理论的研究工作经过半个世纪的停滞以后,从本世纪50年代起又开始活跃起来,目前已进入了新的发展时期^[4~6]。随着数学理论的发展,用现代数学手段描述有限变形运动中的非线性几何方程已日趋完善,这是软岩力学得以建立的先决条件;同时,也大大拓宽了有限变形力学的工程应用范围,它必将有力地促进该项理论研究的发展。

(2) 软岩力学的试验方法。在力学研究中,一旦出现新的研究对象,就必须配以新的研究手段和方法,即试验方法。除了一些常规的岩石力学试验外,必须开发新的试验方法来分析研究软岩的物理(化学)和力学特性。高压流变特性和水理特性,为软岩物性方程(也称本构方程)的建立提供可靠的理论依据。本书中,我们尝试用分级加载流变试验的方法研究软岩的流变行为和流变损伤特性^[7];用细观力学方法分析软岩的内部矿物成分、组织结构、破坏机理和规律^[8];用记忆材料模拟围岩流变大变形^[9]等新方法。

(3) 软岩大变形物性方程的研究。为了适应严格的有限变形理论分析和有关的数值计算,必须用有限变形力学理论的描述手段建立起相应的软岩大变形物性方程和软岩流变大变形物性方程^[10]。变形体力学理论研究不外乎共性和个性两类。共性研究包括平衡方程、几何方程等;个性研究包括物性方程、边界条件等。正由于有了软岩这个特殊的研究对象,才可谈及软岩力学。因而软岩物性方程在软岩力学研究中占有重要地位。

(4) 建立膨胀岩遇水作用的岩石膨胀理论。膨胀岩遇水作用后的软化、膨胀及崩解是软岩力学必须深入研究的重大课题之一。膨胀岩遇水作用后的膨胀和软化行为与温度升高引起某些材料体积膨胀和硬度降低相类似。受温度应力场理论的启发,我们提出了新的岩石膨胀理论,即湿度应力场理论^[11],建立了较为完整的分析膨胀岩遇水作用问题的物理(化学)、数学和力学基础。

(5) 软岩力学中的数值计算方法。在有限变形力学理论上建立起来的软岩问题的控制方程是高度非线性的,加之岩土工程中围岩边界条件和支护的复杂性,要从数学上给出其系统的解析解是十分困难的。因而必须发展相应的数值计算方法,例如非线性大变形有限元计算方法^[12]。

(6) 软岩力学的应用性研究。岩石力学是一门应用性极强的工程学科,而软岩力学更是如此。发展软岩力学的根本目的就是解决软岩工程中的实际问题。

第一章 软岩工程概况

§ 1.1 软岩工程的地质特征

随着岩土工程规模和范围的扩大,出现了越来越多的用传统方法难以控制的岩体。广义地讲,与这类岩体有关的工程都可称为软岩工程。在软岩工程中遇到的岩体大致可分为 5 种。

一 原生松散岩体

原生松散岩体,是指没有经受过较大规模地质变迁或工程破坏,而其力学性质天生就较为松软的岩体。这种岩体又可分为两类。

1. 沉积岩类松散岩体

这是一种低强度、弱胶结的原生松软岩体,大多是新生代第三纪或第四纪的沉积岩。这类岩体在成岩过程中,只经过沉积压紧,胶结十分弱,是介于岩石和积土之间的过渡性岩体。如砾岩、粗粒砂岩、细砂岩、粉砂岩、砂质泥岩等。

2. 喷出岩类松散岩体

这是一种高强度、弱胶结的原生松散岩体,如由火山灰形成的凝灰岩体。这种岩体虽强度较高,但遇水就崩解、膨胀,具有软岩的多种属性。在地下工程中,巷道底板容易与水接触,故凝灰岩巷道底臃现象非常严重。

二 次生松软岩体

次生松软岩体一般是指岩石强度较高而岩体强度很低的岩

体。由于岩体受到内部结构面切割,所以岩体的整体强度远小于单个岩块的强度。根据岩体受结构面切割后岩石块体的大小和形状,可将岩体分成如下3种结构。

1. 块状结构

这种结构的块体大小大致相当。块体的大小是个相对的概念,作为软岩型结构的块体,其大小一般与工程开挖的尺寸大致相等。如果远大于工程开挖尺寸,一般可归属为较坚硬岩体。

2. 块裂结构

这种结构的块体大小不等,大块体与小块体之间夹杂着许多碎裂细块体。当工程开挖穿越较大范围的碎裂细岩块区域时,支护就十分困难。

3. 松散结构

这种结构一般是岩体受到大规模和复杂的地质运动作用后形成的,整个岩体都十分破碎,块度细且均匀。如梅河三井鳞片状页岩,由于受大型地质构造影响,在页岩中已看不出原来的层理面,而出现了很紊乱的叶理化和片理化结构,并且滑面裂隙非常发育,裂隙密度可以用毫米计,它处于强烈的剪碎带。

三 岩体中的软弱岩层

若断层破碎带宽度在数毫米至数厘米之间,其间的软弱夹层不会直接构成对工程的危险。但当断层破碎带宽度达数米时,有可能整个开挖工程都在软弱夹层内进行,这时围岩的稳定性就十分难以控制。如梅河三井,有一断层破碎带宽度达40m,断层泥粒度细、塑性大、摩擦系数低、易泥化,因而是岩土工程最危险区域。

四 膨胀岩

膨胀岩是遇水作用后产生体积膨胀、岩性软化、碎裂、泥化等现象的一类岩石。膨胀岩,都属于软岩。吸水后产生膨胀(包括脱水风化)的岩石种类较多,如泥岩、页岩、粘土岩、泥质粉砂岩、石膏、芒硝等。从吸水膨胀的机理上又可将其分为两大类:一类为遇

水发生化学反应的膨胀岩,如硬石膏、无水芒硝等,此类岩石因吸水变相和结晶引起体积膨胀,膨胀率可高达 61%;另一类是遇水发生物理性质变化的岩石,一般均含有强亲水性粘土矿物。强亲水性矿物是指蒙脱石、伊利石和高岭石等。粘土类膨胀岩的膨胀机理来自于颗粒间或晶间的吸水膨胀,此类矿物含量越多,膨胀率就越高。由于膨胀性泥质岩在自然界中约占地壳岩体的 50% 以上,因此,一般膨胀岩的研究主要是针对粘土类膨胀岩的。

含高岭石和伊利石较多的软岩遇水作用后,主要是以产生软化和崩解现象为主,一般体积膨胀现象不严重。含蒙脱石矿物较多的软岩遇水作用后,将产生较为明显的体积膨胀,有时甚至产生剧烈的膨胀,体积膨胀率可超过 100%。

五 复杂地应力作用下的岩体

所谓复杂地应力作用有两层含义:一是指地下深部矿井或硐室受到的高地应力;另一是指受到复杂地壳运动作用造成的最大主应力方向不为铅直方向的地应力,主应力值一般也很大。

工程岩体的坚硬和软弱是相对的,地应力越高或工程开挖的范围越大,围岩变形量就越大,破坏程度就越严重,稳定性就越难控制。因而,高地应力问题成为软岩工程研究亟待解决的突出难题。据全世界统计资料表明,煤矿的开采深度正以每年 15 m 的速度向下延伸,如我国的张小楼矿、孙村矿和赵各庄矿等,井深已超过 1000 m,德国最深的矿井为 1450 m,前苏联最深的矿井已达 1550 m,所以深部矿井围岩稳定性的控制是软岩工程中的突出难题。国外某些矿井最近统计表明,随着井深增加 1 倍,支架的承载能力也需提高 1 倍,而井巷维护的费用却要增加 1.4 倍,工作量增加 1.5 倍。

传统煤矿支护设计中一般只注重巷道或硐室顶部的来压,但在复杂地应力作用下侧向或底部来压与顶部来压有相同的量级,且难以估算和控制,因而这类问题也属于软岩工程研究的范畴。

§ 1.2 软岩的定义

关于软岩的定义,迄今为止国内外学者对此仍存在着分歧。1981年在东京召开的“国际软岩学术讨论会”上,试图给软岩定义为“软弱、破碎和风化岩石”。从软岩工程的地质特征看,这种定义显然是有局限性的。由于受工程活动的范围和对工程岩体复杂特征理解的局限,各种文献中关于软岩的定义名目繁多^[13~19],各有异同。综合各种意见,我们可以从3个方面考虑软岩的定义。

一 软岩内部结构和成分描述

从较大的地质区域范围内描述软岩,一般是指被多重切割面切割成块状或碎块状的岩体,或者是指被较大范围内和复杂地质构造运动挤压和扭曲成的碎状岩体。

通过光学显微镜可以清楚地观察到软岩试块内部组织情况和定性地确定砂、粉粒分布,孔隙大小和分布,颗粒聚集体和定向度等。

图1-1是正交偏光显微镜下淮南潘集泥岩(放大40倍)的结

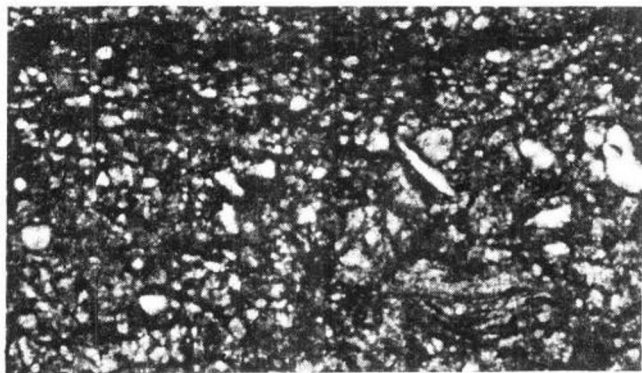


图1-1 泥岩内部结构(放大40倍)

构形态图。从彩色图上可以看到：①试块内部具有明显的构造痕迹（裂痕）；②粘土矿物主要以聚集体的形式存在，在聚集体与聚集体间存在有较大的孔隙，内部孔隙则较细；③孔隙与孔隙间有微裂纹贯通起来，这给水或其他流体渗入岩体内部建立了通道；④矿物颗粒聚集虽然大小不一，但有较明显的定向性，这种定向性决定着软岩的各向异性力学性质和各向异性遇水膨胀特性。

采用扫描电镜，一般在放大 500~2000 倍的情况下，可以观察到软岩矿物微颗粒的内部结构。从图 1-2 可以看到，强度较高的粉砂粒子是嵌在粘土颗粒为基底的基质中的，相互之间几乎没有直接接触。可见，软岩的变形和传力主要由基质——粘土承担。

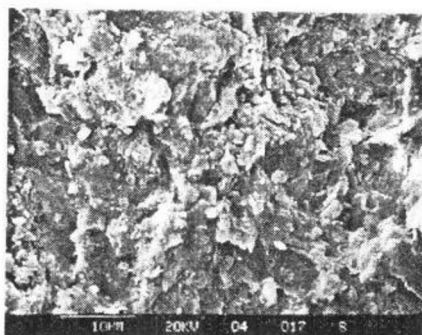


图 1-2 泥岩微结构

从细观结构上描述，软岩微结构具有“松”和“散”的特征。“松”是岩石在成岩过程中由于原岩急剧冷却，气体大量逸出或受风化变质作用的影响，使岩石结构疏松、质量减小、孔隙率增大的综合反映。这种岩石在煤矿较少遇到，一般赋存在浅部，如火山灰形成的浮石等。“散”是由于岩石在成岩过程中仅是沉积、压紧，而少固结，成岩时间较短造成的，在煤矿经常遇到这类岩石。

采用 X—射线衍射和热像分析等方法可确定岩石的矿物成

分。根据实验和资料^[13],列出我国部分煤矿软岩矿物成分分析结果,表1-1主要是由高岭石、伊利石、蒙脱石和伊蒙混合层组成。

表 1-1 软岩的粘土矿物成分

采样地点	岩 性	粘土矿物成分			
		高岭石 (%)	伊利石 (%)	蒙脱石 (%)	伊蒙混层 (%)
山东鲍店	泥 岩	42.4	20.6		37
平顶山七矿	泥 岩	37~51			63~49
平顶山十一矿	泥 岩	32	12		56
徐州董庄矿	泥 岩	51			49
徐淮北芦岭矿	泥 岩	36	10		54
济宁二号井	粘 土 岩	25			75
淮南潘集矿	泥 岩	38.2			61.8
龙口北皂	油母页岩	25.8	9.7	64.5	
内蒙平庄	粘 土 岩	11.5	7	81.5	
吉林舒兰	泥 岩	39.3	6	54.7	
广东茂名	泥 岩	59.4	29.0		

软岩矿物颗粒之间不像坚硬岩石那样是晶体连结。晶体连结不仅赋予岩石以很高的强度,而且使岩石有明显的抗水性,浸水后连结力并无明显削弱,软化系数较小。而软岩颗粒之间的胶结程度较差,缺乏牢固的连结。一般情况下只是水连结、水胶连结、泥质胶结或凝灰胶结,甚至颗粒之间无连结。

二 软岩的力学指标描述

从力学特性上描述软岩,可以用“软”和“弱”两个字作定性概括。

“软”指的是这类岩石受力作用后容易产生变形,且流变特性十分明显。一般坚硬岩石的弹性模量可以超过 50 GPa,甚至超过 100 GPa,而软岩的弹性模量常常低于 15 GPa。另一方面,软岩容易产生塑性变形,遇水易发生崩解、膨胀和泥化、脱水易风化等。