



“十二五”国家重点图书出版规划项目

中国科学技术大学 *精品* 教材



席道瑛 徐松林 / 编著

岩石物理 与本构理论

Rock Physics
and Constitutive Theory

中国科学技术大学出版社



“十二五”国家重点图书出版规划项目

中国科学技术大学 **精品** 教材



席道瑛 徐松林 / 编著

Rock Physics and Constitutive Theory

岩石物理 与本构理论

中国科学技术大学出版社

内 容 简 介

本书围绕多孔岩土材料本构理论的建立,较全面地讲述了多孔岩土材料的实验现象和相关本构理论。全书共 11 章,内容主要包括:实验室和野外实验,非线性弹性理论,经典弹塑性理论及其发展,多孔岩土材料的弹塑性本构,内变量理论,多孔岩土材料的动态响应及本构描述,颗粒材料的数值方法,以及相关工程应用。

本书包含了国内外最新的研究成果,具有较强的前沿性;在内容的组织上注重追本溯源,具有较强的基础性。本书可供地球科学、岩土工程、环境、水利、矿山等领域的高等院校和科研单位研究人员参考,也可作为相关专业研究生的教材。

图书在版编目(CIP)数据

岩石物理与本构理论/席道瑛,徐松林编著. —合肥:中国科学技术大学出版社,2016. 4
(中国科学技术大学精品教材)

“十二五”国家重点图书出版规划项目

ISBN 978-7-312-03691-0

I. 岩… II. ① 席… ② 徐… III. 岩石物理学—研究 IV. P584

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2016) 第 005706 号

中国科学技术大学出版社出版发行

安徽省合肥市金寨路 96 号,230026

<http://press.ustc.edu.cn>

安徽省瑞隆印务有限公司印刷

全国新华书店经销

开本:787 mm×1092 mm 1/16 印张:43.75 插页:2 字数:1071 千

2016 年 4 月第 1 版 2016 年 4 月第 1 次印刷

印数:1—2000 册

定价: 80.00 元



编审委员会

主 任 侯建国

副主任 窦贤康 陈初升

张淑林 朱长飞

委 员 (按姓氏笔画排序)

方兆本	史济怀	古继宝	伍小平
刘 斌	刘万东	朱长飞	孙立广
汤书昆	向守平	李曙光	苏 淳
陆夕云	杨金龙	张淑林	陈发来
陈华平	陈初升	陈国良	陈晓非
周学海	胡化凯	胡友秋	俞书勤
侯建国	施蕴渝	郭光灿	郭庆祥
奚宏生	钱逸泰	徐善驾	盛六四
龚兴龙	程福臻	蒋 一	窦贤康
褚家如	滕脉坤	霍剑青	

总 序

2008年,为庆祝中国科学技术大学建校五十周年,反映建校以来的办学理念和特色,集中展示教材建设的成果,学校决定组织编写出版代表中国科学技术大学教学水平的精品教材系列。在各方的共同努力下,共组织选题281种,经过多轮、严格的评审,最后确定50种入选精品教材系列。

五十周年校庆精品教材系列于2008年9月纪念建校五十周年之际陆续出版,共出书50种,在学生、教师、校友以及高校同行中引起了很好的反响,并整体进入国家新闻出版总署的“十一五”国家重点图书出版规划。为继续鼓励教师积极开展教学研究与教学建设,结合自己的教学与科研积累编写高水平的教材,学校决定,将精品教材出版作为常规工作,以《中国科学技术大学精品教材》系列的形式长期出版,并设立专项基金给予支持。国家新闻出版总署也将该精品教材系列继续列入“十二五”国家重点图书出版规划。

1958年学校成立之时,教员大部分来自中国科学院的各个研究所。作为各个研究所的科研人员,他们到学校后保持了教学的同时又作研究的传统。同时,根据“全院办校,所系结合”的原则,科学院各个研究所在科研第一线工作的杰出科学家也参与学校的教学,为本科生授课,将最新的科研成果融入到教学中。虽然现在外界环境和内在条件都发生了很大变化,但学校以教学为主、教学与科研相结合的方针没有变。正因为坚持了科学与技术相结合、理论与实践相结合、教学与科研相结合的方针,并形成了优良的传统,才培养出了一批又一批高质量的人才。

学校非常重视基础课和专业基础课教学的传统,也是她特别成功的原因之一。当今社会,科技发展突飞猛进、科技成果日新月异,没有扎实的基础知识,很难在科学技术研究中作出重大贡献。建校之初,华罗庚、吴有训、严济慈等老一辈科学家、教育家就身体力行,亲自为本科生讲授基础课。他们以渊博的学识、精湛的讲课艺术、高尚的师德,带出一批又一批杰出的年轻教员,培养了一届又一届优秀学生。入选精品教材系列的绝大部分是基础课或专业基础课的教材,其作者大多直接或间接受到过这些老一辈科学家、教育家的教诲和影响,因此在教材中也贯穿着这些先辈的教育教学理念与科学探索精神。

改革开放之初,学校最先选派青年骨干教师赴西方国家交流、学习,他们在带回先进科学技术的同时,也把西方先进的教育理念、教学方法、教学内容等带回到中国科学技术大学,并以极大的热情进行教学实践,使“科学与技术相结合、理论与实践相结合、

前 言

本构理论(constitutive relationship)描述的是宏观和细微观尺度下,材料或结构在外载荷作用下的响应,属于材料物理力学特性范畴。从描述材料线弹性特性的胡克(Hooke)定律发现至今,已经形成各种类型材料的本构理论。本构理论的研究已经非常深入,相关认识也已经非常深刻。但是对于岩土介质而言,大多数的本构描述属于经验型描述,沿用基于连续介质假定的固体力学模型,均有其局限性,这使得在运用已有的本构理论处理以下实际问题时经常遇到困难:岩体应力-应变全过程的描述,应变软化现象的描述,Ⅱ型后区的存在性和相关描述,复杂应力路径下岩体的响应描述,等等。

岩土介质作为自然存在的岩石和土的总称,是地球上最广泛存在的工程材料,对其研究由来已久。岩土介质一般具有细微观的孔洞、裂纹,宏观的节理、裂隙等几何缺陷,因此,自然存在的岩体具有多重尺度(multi-scale)、多相(multi-phase)等特性,是极其复杂的材料。例如,火山喷出岩和一些砂岩的孔隙度可达20%,大多数的结晶岩的孔隙度为0.1%~1%,其他岩石的孔隙度介于这两者之间。对这种复杂介质进行本构描述是非常困难的。国内外所做的努力很多。除了各类会议中的专题讨论之外,逐渐形成了一些专门的会议:2007年第一届国际岩土本构研讨会在香港理工大学举行,2012年10月在清华大学举行了第二届,第三届于2014年在日本京都大学举行;同期,2008年11月在北京航空航天大学举行了第一届全国岩土本构理论研讨会,第二届于2014年5月在上海大学举行。这些举措表明了岩土本构理论研究及其在工程和基础研究领域的地位日益增加。

从目前的研究成果来看,大多数理论仍立足于等效介质假定的连续介质模型。编写本书的目的是:希望能抛砖引玉,以多孔岩土介质的描述为契机,逐步形成描述此类复杂材料的本构理论。出于此目的,本书的组织具有以下3个明显的特点。①注重实验和理论的结合。岩石力学本身是基于实验的学科,不同岩石试样的力学行为差异性很大,要对特定的对象进行合理描述,其前提是对特定对象有较充分的实验室和现场的物理力学实验测试。本书在材料组织上比较注重实验事实与本构模型建立之间的联系。②注重宏观力学和细微观力学的结合。材料的宏观响应与材料的细微观结构的变形发展是息息相关的。对于多孔岩土材料而言,已不能将其作为简单的等效介质进行处理,需要考虑其细微观尺度几何结构对整体宏观力学响应的影响。本书在实验部分特别介绍了多孔岩石的实验技术,在理论模型的介绍中特别介绍了多孔材料的力学模型的建立。③注重静力学和动力学的结合。复杂材料与均匀材料力学行为的区

目 次

总序	(i)
前言	(iii)
绪论	(1)
0.1 发展多孔岩土材料本构理论的重要性和迫切性	(1)
0.2 与其他学科的关系	(3)
0.3 发展历史及研究动向	(4)
第 1 章 岩土本构理论相关基础	(6)
1.1 应变与应变张量	(6)
1.2 应力张量与运动方程	(8)
1.3 偏应力张量与偏应变张量	(9)
1.4 主应力空间与 π 平面	(12)
1.5 一般力学分析体系	(14)
1.6 本构关系的一般理论	(15)
参考文献	(17)
第 2 章 多孔岩土材料的实验研究	(18)
2.1 岩石的典型实验及相关讨论	(18)
2.1.1 加载路径与岩石力学实验	(18)
2.1.2 单轴压缩的控制条件及 II 型全过程线的获得	(19)
2.1.3 II 型全过程线的存在性与岩石材料的结构性	(21)
2.1.4 等围压三轴压缩实验与岩石强度准则	(24)
2.2 多孔岩土介质的结构特性实验研究	(28)
2.2.1 扫描电子显微镜(SEM)镜下观察	(28)
2.2.2 CT 扫描技术	(29)
2.2.3 压汞法与孔隙度测定谱	(32)
2.3 高孔隙度岩石局部变形带的野外证据和实验研究	(33)
2.3.1 高孔隙度岩石局部变形带的野外证据	(34)
2.3.2 高孔隙度岩石压缩带实验研究结果	(39)
2.3.3 高孔隙度岩石中的孔洞崩塌	(46)

2.3.4 高孔隙度岩石中压缩带的传播	(50)
2.4 土体中的压缩实验	(53)
2.4.1 侧限压缩实验	(53)
2.4.2 土体中的常规三轴压缩实验($\sigma_1 \geq \sigma_2 = \sigma_3$)	(54)
2.5 小结	(56)
参考文献	(56)
第3章 岩土材料非线性弹性本构模型	(60)
3.1 一般弹性	(60)
3.2 非线性弹性分析方法	(65)
3.3 岩土介质中典型非线性弹性分析	(67)
3.3.1 $E-\nu$ 弹性模型(双曲线模型)	(68)
3.3.2 $K-G$ 弹性模型	(73)
3.3.3 非线性的变弹性体模型	(75)
3.3.4 变模量模型	(79)
3.4 双曲线模型用于岩土材料的非线性弹性分析	(89)
3.4.1 双曲线模型用于饱和砂土	(89)
3.4.2 双曲线模型用于岩土体的各向异性研究	(93)
参考文献	(99)
第4章 岩土材料塑性模型	(102)
4.1 流动法则与增量型本构关系	(102)
4.1.1 塑性应变增量	(102)
4.1.2 流动法则	(103)
4.1.3 屈服面与硬化模型	(105)
4.1.4 增量型本构描述	(106)
4.2 加、卸载条件	(111)
4.3 常用屈服面模型	(111)
4.3.1 Tresca 屈服面	(112)
4.3.2 Mises 屈服面	(112)
4.3.3 Mohr-Coulomb 屈服面	(113)
4.3.4 Drucker-Prager 屈服面	(115)
4.3.5 Hoek-Brown 屈服面	(117)
4.4 岩土介质中的帽盖模型	(118)
4.4.1 剑桥模型	(118)
4.4.2 K-W 模型	(131)
4.4.3 L-D 模型	(132)
4.4.4 Rowe 剪胀模型	(135)
4.4.5 几个帽盖模型实例	(137)

4.5 岩土介质屈服模型的统一形式	(143)
4.6 岩土介质塑性理论的数值计算	(146)
4.6.1 半径回归法	(146)
4.6.2 严格的增量型本构算法	(149)
4.6.3 软化材料的计算	(150)
4.7 岩石的非相关联黏塑性本构模型	(152)
4.7.1 实验结果	(153)
4.7.2 本构方程	(156)
4.7.3 与实验结果的比较	(160)
4.8 土的弹黏塑性本构模型的发展	(163)
4.8.1 天然软黏土的力学特征	(164)
4.8.2 研究进展	(165)
4.8.3 弹黏塑性本构模型及验证	(166)
4.9 屈服面理论模型的发展	(176)
4.9.1 多重屈服面的发展	(176)
4.9.2 非等向硬化(软化)模型	(179)
4.9.3 基于多机制概念的塑性模型	(180)
4.9.4 结构性岩土介质的数学模型	(181)
4.10 无屈服面的塑性模型	(187)
4.10.1 基于塑性耗散能的本构关系	(187)
4.10.2 无屈服面黏塑性模型	(189)
4.11 岩石结构面的弹塑性本构关系	(191)
4.11.1 岩石结构面的本构关系	(191)
4.11.2 模型参数	(195)
4.11.3 模型验证	(199)
4.12 小结	(205)
参考文献	(205)
第5章 多孔岩土材料塑性理论及其应用	(213)
5.1 多孔岩土材料的屈服面模型	(213)
5.1.1 Gurson 屈服面模型	(213)
5.1.2 Gurson-Tvergaard-Needleman 模型	(218)
5.1.3 孔隙介质屈服面模型小结	(219)
5.2 多孔岩土材料的 MSDPu 屈服模型	(226)
5.3 多孔岩土模型应用:从剪切包络线向帽盖的光滑过渡	(234)
5.4 多孔岩土塑性理论用于局部化变形带的研究	(238)
5.4.1 高孔岩石的典型应力-应变关系曲线	(238)
5.4.2 压缩带和剪切带与帽盖模型的关系	(239)
5.4.3 高孔岩石中压缩带、剪切带和膨胀带的形成条件	(241)

7.1.2 间断波和连续波	(338)
7.2 波阵面的分析	(341)
7.2.1 波阵面质量守恒条件	(341)
7.2.2 波阵面动量守恒条件	(342)
7.2.3 波阵面能量守恒条件	(343)
7.2.4 波速	(343)
7.3 冲击波的性质	(344)
7.3.1 冲击波形成的条件	(344)
7.3.2 冲击绝热过程	(345)
7.4 介质的波阻抗和动态响应	(350)
7.5 波阵面运动的描述	(351)
7.5.1 空间坐标	(352)
7.5.2 物质坐标	(353)
7.6 物质坐标中连续波的控制微分方程组	(355)
7.6.1 物质坐标中的质量守恒定律	(356)
7.6.2 物质坐标中的运动方程:动量守恒	(356)
7.6.3 物质坐标中的能量守恒	(357)
7.7 动态本构的实验研究以及冲击波的静态和动态响应模型	(358)
7.7.1 实验方法	(359)
7.7.2 拉格朗日分析方法的计算理论	(363)
7.7.3 波形特征分析	(364)
7.7.4 实验结果分析	(365)
7.7.5 干燥的 Kayenta 砂岩的静力和动力响应模型	(370)
7.8 状态方程与本构关系	(378)
7.8.1 固体中的状态方程和应力-应变关系	(378)
7.8.2 常见的高压状态方程	(379)
7.9 脆性材料压剪联合冲击特性	(382)
7.9.1 脆性材料压剪联合冲击实验与 S 波跟踪技术	(382)
7.9.2 水泥基复合材料压剪联合冲击性能	(388)
7.9.3 岩盐压剪联合冲击性能	(395)
参考文献	(399)
第 8 章 脆性材料动力学特性研究	(402)
8.1 高应变率加载下土壤的压缩性能:黏塑性帽盖模型	(402)
8.1.1 黏塑性帽盖模型	(402)
8.1.2 算法	(404)
8.1.3 模型验证	(406)
8.1.4 爆炸实验的数值模拟	(408)
8.2 混凝土的冲击特性描述:动态帽盖模型	(412)

10.2.4	运动法则	(490)
10.2.5	颗粒的破碎	(490)
10.2.6	模型建立	(492)
10.2.7	数值化阻尼与衰减关系	(493)
10.2.8	颗粒联结模型	(493)
10.2.9	实际应用的验证及合理性	(495)
10.2.10	Lac du Bonnet 花岗岩模型中剪切断裂的演化	(499)
10.2.11	Westerly 花岗岩中剪切断裂的演化	(502)
10.3	颗粒离散模型用于脆性材料动态响应的研究	(505)
10.3.1	石英砂压缩性能研究的多尺度模型	(505)
10.3.2	石英砂动态压缩性能模拟	(513)
10.4	颗粒离散模型用于混凝土材料层裂特性研究	(519)
10.4.1	混凝土层裂实验	(519)
10.4.2	实验结果	(520)
10.4.3	数值分析	(521)
10.4.4	水泥层裂现象的数值模拟	(524)
10.5	固液混合物在颗粒接触范畴的本构关系	(527)
10.5.1	模型的提出	(527)
10.5.2	公式	(529)
10.5.3	宏观本构关系作为接触函数的推导	(533)
10.5.4	宏观本构关系作为接触函数 φ_{ij} 的固-液混合物的结构依赖性	(535)
10.5.5	讨论	(541)
10.6	岩石断裂破坏的水流、应力和损伤(FSD)耦合模型分析方法	(543)
10.6.1	水流-应力-损伤耦合模型	(544)
10.6.2	用 RFPA ^{2D} 源程序进行 FSD 模型的数值计算	(547)
10.6.3	模型验证的实例及探讨	(547)
10.7	脆性变形状态下多孔颗粒岩石力学行为的孔隙裂纹模型	(553)
10.7.1	模型的提出	(553)
10.7.2	孔隙裂纹模型	(554)
10.7.3	砂岩的实验与理论比较	(559)
10.8	节理岩块在动态循环加载作用下的力学特性和疲劳损伤模型	(566)
10.8.1	非贯通节理岩体模型实验	(566)
10.8.2	节理岩体的动态强度特性	(567)
10.8.3	非贯通节理岩体的疲劳损伤模型	(568)
	参考文献	(571)
第 11 章	岩土本构模型的工程应用	(580)
11.1	盐岩蠕变本构方程与核废料长期储存的预测	(580)
11.1.1	概述	(580)

绪 论

0.1 发展多孔岩土材料本构理论的重要性和迫切性

1. 基本观点

编写本书的目的是让大家知道本构理论是指什么,运用它能干什么以及能解决什么岩土工程实际问题。

本构理论是力学中的一个最基本的理论,是现代岩土力学的核心问题,是岩土工程及岩土力学界一个经久不衰的研究课题。它表征着材料在复杂应力状态和加载历程、多种应变率和复杂的环境因素影响下各种物理参量间的定量关系。这种取决于物质内部组织构造的固有关系的数学表达式(本构方程)是研究各种变形体力学问题的基本依据。它对于在更高层次和更符合物性的基础上发展岩土力学及其相关学科和应用分支学科具有重要的理论意义;同时,它又是进行岩石的强度、刚度,地基的稳定性、可靠性等大量工程力学、岩土力学分析的基础。因此,它对于解决国民经济重大工程建设及找矿、采矿具有重要的应用价值。由于一个国家在该领域中的研究水平和态势在很大程度上标志着这个国家岩石力学研究的理论高度和研究活力及其工程设计基础的水平,因而该项研究也是我国力学赶上国际先进水平的突破口,应该把该项研究作为地学和岩石力学学科优选的基础研究方向,以期促进地学和岩石力学学科向纵深发展,给地学注入新的活力,并为那些迄今为止难以分析的工程及找矿问题的解决提供新的基础和希望。

2. 岩石和岩体的本构理论

本构理论是探讨应力波在岩石介质中的传播规律及其与地下结构相互作用的基础。在估计地下结构对地震和各种爆炸作用的抵抗能力,以便设计经得起这些作用的防护结构时,在预报周围环境的运动及确定结构-岩石介质相互作用(也就是工程抗震)时,都需要对岩石和岩体介质的动力响应进行精确描述。近年来,岩石本构理论也被用于地震成因和机制的研究、地震工程的分析。研究爆炸源产生的应力波在岩体介质中的传播时要考虑爆心处的高温高压汽化区、爆心临近处的熔化区或流体动力区以及距爆心一定距离的弹塑性固体区。对于这样广的状态范围,要用单一的本构模型或状态方程来描述材料的性状,显然是不可能的。对于高温高压汽化区(几百万大气压以上),一般采用自由电子汽化理论进行计算。对