

国家科学技术学术著作出版基金资助出版

岩土材料流变及其工程应用

孙 钧 著

中国建筑工业出版社

图书在版编目(CIP)数据

岩土材料流变及其工程应用/孙钧著. —北京: 中国建
筑工业出版社, 1999. 10
ISBN 7-112-03967-3

I. 岩… II. 孙… III. 建筑材料 非金属材料. 岩
土介质-流变性质-研究 IV. TU521.02

中国版本图书馆 CIP 数据核字(1999)第 39084 号

国家科学技术学术著作出版基金资助出版
岩土材料流变及其工程应用
孙 钧 著

※
中国建筑工业出版社出版、发行(北京西郊百万庄)
新华书店经销
北京市兴顺印刷厂印刷

※
开本: 850×1168 毫米 1/16 印张: 45½ 插页: 1 字数: 1163 千字
1999 年 12 月第一版 1999 年 12 月第一次印刷
印数: 1—1000 册 定价: 115.00 元
ISBN 7-112-03967-3
TU·3098 (9346)
版权所有 翻印必究
如有印装质量问题, 可寄本社退换
(邮政编码 100037)

本书为研讨岩土介质材料流变性状与解析方法及其工程应用问题的一本学术专著。全书共八篇、二十五章,合约 115 万字。书中内容主要包括:岩土材料流变学的研究内容、范畴和研究工作的重要性,岩土材料流变特性和室内试验;在土体流变方面,主要有:软粘土流变本构关系、力学模型及其解析方法,软土流变理论与方法在土体工程中的应用实践,以及饱和淤泥质粘土非线性流变理论的进一步分析;在岩体流变方面,主要有:岩体流变特性和分析方法,岩体粘弹-粘塑性本构模型辨识与参数估计,以及岩体流变问题的工程应用等。本书是作者及其所在的研究集体近十多年来在这一子学科领域科研工作的系统总结,书中绝大部分内容尚未在其它处公开发表。本书在学术理论内涵方面,有如对:耦合流变、三维流变、非线性流变、蠕变损伤与断裂以及流变模型辨识和岩土流变细观力学实验等复杂问题均有一定的开拓和进取;在岩土工程的应用实践方面,有如对:软基变形、强度与稳定及在施工过程中位移、沉降等随时间的增长变化,洞室开挖、围岩-支护系统的历时稳定性以及岩质边坡流变效应等也都有相当的研究分析,集有较为丰富的工程实践应用资料。

本书可供建筑工程、水利水电、煤炭矿山、铁道公路、市政、国防与人民防空工程以及结构工程、地基基础、岩土力学与工程等方面从事勘察、设计、施工、科研与教学的广大科技人员和有关专业教师与研究生们参考阅读。

孙 钧 院 士 简 历



孙钧,祖籍浙江绍兴,1926年10月生于苏州。1949年5月上海国立交通大学土木工程系毕业。早年(1954~1956)随苏联桥梁专家 И.Д. 斯尼特柯教授学习,并担任专家技术口译。1980~1981年去美国留学,在北卡罗莱纳州立大学任访问教授。

他青年时期在母校交通大学任教,1952年秋全国院系调整,转调同济大学任讲师(1953)、副教授(1962)和教授(1979)迄今。1991年经选任为中国科学院(技术科学部)学部委员,1993年后改任院士。现任同济大学岩土工程系教授、校务委员、校学术委员会委员、名誉系主任,同济大学科学技术研究院首批重点学术梯队学科负责人。现任校外学术兼职主要有 国际岩石力学学会副主席暨中国国家小组主席、中国科协全国委员会委员、中国岩石力学与工程学会名誉理事长(上届理事长)、中国土木工程学会顾问、名誉理事(上届副理事长),全国‘博士后’管委会专家组成员、中国自然科学奖评委,交通大学、浙江大学等多所知名大学的顾问教授和兼职教授以及国外一些大学和研究所的客座研究员。在国内工程界,他现任长江三峡工程技术委员会专家组成员、江阴长江公路悬索大桥和上海市地下铁道工程等重大工程的顾问、上海市建委科技委委员,以及上海市建工集团和城建集团、浦东城建委的高级技术顾问等工程技术职务。

50年代,他在工程力学和桥梁工程专业任教;1960年起从事隧道与地下工程专业的教学、科学研究与承担工程任务,迄今已40年。他是我国最早创建‘地下结构工程力学’学科分支(1962)的主要奠基人之一。

数十年来,孙教授长期在岩土力学与工程以及隧道与地下工程结构等学术领域辛勤耕耘,是国内外地下结构学科领域的知名学者和专家。他在岩土流变力学、地下结构粘弹塑性理论和防护工程抗爆动力学等子学科方面有深厚学术造诣,近年来还开拓了城市环境土工学和软科学在岩土力学与工程中的应用等方面的科学研究。

从八十年代初叶起,孙教授结合承担国家基金和部委、省市基金课题、国家各个五年计划重点科技攻关项目和负责或参加重大工程建设与科研任务,在城建、水工、矿山、煤炭、铁道、公路、市政、国防和人民防空等工程部门的地下工程建设中共完成有关工程科研、勘测和设计项目近40项,撰写学术论文160余篇,并专著8部,主要有《地下结构》(上、下卷),1988、《地下结构有限元法解析》,1988、《岩土力学反演问题的随机理论与方法》,1996、《地下工程设计理论与实践》,1996、《新型土工材料与工程整治》,1998、《岩土材料流变及其工程应用》,1999,等等。

他的科研成果经专家评议或鉴定认定:上述方面的若干研究成果达到了国际先进水平或居国内领先地位。先后获国家级科技进步二、三等奖3项、部委级一、二、三等奖7项、由国外和知名人士个人颁发的基金一等奖各1项,连同其它奖励合共20余项。

在从事高校教育工作方面,他受命在同济大学兴办了国内第一所《隧道与地下建筑工程》专业(1960),该专业是我国首批博士学位授权点(地下结构,1981)、首批国家重点学科

(岩土工程、结构工程,1986)和首批‘博士后’科研流动工作站的建站点(土木、水利,1988)。孙本人是我国首批博士研究生导师(1981)。

在教学工作上,孙教授多年来已培养研究生数十名,其中博士毕业生 40 余名,“博士后” 11 名。以他命名的学术梯队和院士研究室集体正为我国岩土力学与工程事业的发展而积极努力。

(撰稿人 郑宜枫,1999 年 7 月)

前 言

岩土力学与工程是一门理论内涵丰富而又实践性很强的工程应用学科。当前,这方面的研究和实践在国内外都非常活跃,已经取得了许多可喜的高水平的成果。但是,就岩土介质材料工程流变学问题的研究言,尽管它的重要性已为人们所共识,而系统的理论与实验研究却相对比较少,对这类工程中存在问题的深入阐述也还不多见。因此,就这一分支学科领域写作一本学术和技术论著,据现有研究成果进行较为全面的总结并使之成为工程所用,看来是迫切需要的。

在我国,开展岩土流变及其物理、力学属性方面的研究,可以早溯到五十年代末叶。当年,我国岩石力学界的先驱、陈宗基先生学成回国,他曾结合筹建长江三峡工程,作为一项前期技术贮备,进行了有一定规模的节理岩体流变的现场和室内试验研究。嗣后,他又对一系列的理论流变学问题作了富有成果的探讨,无愧是我国岩土流变学研究领域的学术奠基人。同济大学郑大同教授结合上海地区软粘土流变的特点,也进行过相当系统深入的研究。似水流年,逝者已矣,在此书成之时,缅怀先哲,更激励后学者要发奋进取,献我绵薄。

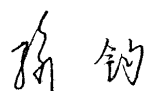
在我国广袤无垠的大地上,覆盖着大片软土和山地。就软粘土而言,它经常是许多建、构筑物的主要持力层,不少桩基和地下工程也都要设置其上或在它中间穿越通过。软粘土受力作用后其变形位移随时间的增长变化以及它们的后期沉降与土体的长期强度等等都是人们迫切关注的热点。土体产生屈服后粘塑性位移的不利发展将是日后过量不均匀沉降甚或导致地基失稳的主要因素。在岩石地层,则经常遇到软弱结构面和断层、破碎带相互交错,围岩松软、破碎,节理、裂隙等结构面发育,地下水蕴藏丰富,或存在高地应力分布等复杂工程地质条件,它们对洞室、边坡和坝基工程的长期持续稳定性将构成潜在的威胁与隐患。所有这些,都是岩土材料流变,包括蠕变、应力松弛和长期强度衰减等方面探讨的重点和主要问题。

本书为研讨岩土材料流变及其工程应用问题方面一本较系统的论著,全书共八篇、二十五章,(其中,第一篇共3章为综合介绍,第二~五篇共12章为软土流变部分,第六~八篇共10章为岩石流变部分),合约120万字。书中内容主要包括:(1)岩土介质在施工开挖等外力作用下其变形位移和应力随时间增长而发展变化的特性和规律;(2)室内流变试验的仪器设备、测试方法和试验结果;(3)岩土流变学的理论和方法,特别是其‘应力-应变-时间’的本构关系与计算模型,还包括岩土流变细观力学实验、模型辨识与参数估计,以及土体固结-流变混合问题、蠕变与松弛的耦合、岩体蠕变损伤与断裂、渗流场与流变应力场相互作用等复杂性态。对岩土非线性流变力学行为与三维流变问题等也都进行了有一定深度的研讨;(4)岩土流变问题解析的数值方法,除有限元法以外还介绍了边界元法及其混合求解;和(5)流变分析在各类岩土工程(在土工方面有如:大楼地基沉降、基坑开挖和堆场整体稳定,

等等,在岩工方面有如:大断面洞室围岩与支护系统、水电站地下厂房和有压水工隧洞以及高陡边坡工程,等等)方面的应用实践近 10 处。

本书是作者及其所在学科组(包括许多研究生们的工作)晚近十余年来承担有关国家和部委基金、“六五”、“七五”和“八五”国家重点科技攻关项目以及参加多项重大岩土工程建设研究任务所取得的科研成果与系统总结,其中大部分内容已在相关工程设计与施工的实践中得到了较成功的采用和检验。书中所述内容和方法在岩土工程流变学子学科领域有相当的开拓和进取,许多成果在国内外现有文献资料中尚未见报导。一些内容在学术理论上似尚有创新特色,诸如:岩土蠕变细观力学试验研究,流变损伤的时效特性,土体蠕变与固结的混合问题,蠕变与应力松弛的耦合分析,渗流场与流变应力场的耦合机理,非线性流变,蠕变损伤与断裂,流变本构模型的粘弹、粘塑性辨识与参数估计,以及流变分析的三维问题等等,均是国内外工程流变学界当前研究的前沿课题。相信以上研究成果对工程实践采用当有参考助益。我们认为,将这些点滴体会和认识撰述成册以飨读者,并使之进一步地为更多工程建设服务,将会是对作者的巨大鼓舞和鞭策。

限于作者的水平与经验,书中内容想多谬误不当之处,尚望读者批评指正。



写于 1999 年仲春
同济大学岩土工程研究所

目 录

前 言

第一篇 工程材料流变问题的解析方法和室内试验

第 1 章 绪论——国内外文献综述与评价	3
§ 1.1 概述——材料流变的定义和研究工作的重要性	3
§ 1.2 流变理论概要	4
§ 1.3 微分型流变本构方程及其力学模型	7
§ 1.4 积分型流变本构方程及其力学模型	8
§ 1.5 关于工程流变问题的解析方法	10
§ 1.6 岩土材料的非线性流变问题	11
第 2 章 流变模型理论与岩土材料流变特性	15
§ 2.1 岩土材料流变本构方程	15
§ 2.2 线性粘弹塑性模型理论	17
§ 2.3 非线性流变特性分析	26
§ 2.4 岩土材料非线性蠕变变形的组成	37
第 3 章 岩土材料流变的室内试验研究——仪器设备与试验方法	43
§ 3.1 概述	43
§ 3.2 土的室内流变宏观力学试验	43
§ 3.3 岩石的室内流变宏观力学试验	61
§ 3.4 岩土流变的细微观力学试验	68

第二篇 软土流变的室内试验与有关问题研究

第 4 章 软土流变特性室内试验及其本构模型	75
§ 4.1 上海地区软土的分层和分布	75
§ 4.2 试验所用土样的物理力学指标	76
§ 4.3 土样的蠕变与应力松弛试验	77
§ 4.4 淤泥质粘土的流变特性试验	83
§ 4.5 褐黄色粉质粘土的流变特性试验	95
§ 4.6 暗绿色粉质粘土的流变特性试验	100
§ 4.7 三种典型软粘土的流变试验成果分析	106
§ 4.8 上海地区软粘土的长期强度	107
§ 4.9 上海地区软粘土流变的经验模型	113
§ 4.10 上海地区软粘土的非线性流变本构模型	119
§ 4.11 饱和砂性土的流变特性试验	140

§ 4.12	三向应力状态下饱和砂性土的流变力学模型及其参数拟合	146
§ 4.13	饱和砂性土流变参数拟合结果分析	156
第 5 章	软粘土流变的细微观机理研究	159
§ 5.1	粘土的细微观结构	159
§ 5.2	粘土蠕变的细微观机理	165
§ 5.3	粘土流变微观机理的宏观表现	169
第 6 章	软粘土流变研究中几个问题的探讨	172
§ 6.1	饱和软粘土流变高阶柔量解析	172
§ 6.2	关于粘滞系数 η 的再认识	176
§ 6.3	归一化的软粘土粘弹塑性流变本构模型	181
§ 6.4	软粘土固结与蠕变的统一性	181
§ 6.5	流变试验的时间尺度效应和变形尺度效应	184
§ 6.6	关于软粘土的非线性流变特性	187
§ 6.7	几个问题的小结与分析	198

第三篇 土体流变问题的有限元法解析

第 7 章	二维问题与非线性流变解析	209
§ 7.1	工程流变问题有限元法解析的思路与步骤	209
§ 7.2	SUN 系列机和 PAFEC—FE 有限元法解析的通用软件包简介	211
§ 7.3	土体二维非线性流变问题有限元法解析的增量-迭代方法	212
第 8 章	三维非线性流变问题解析	219
§ 8.1	三维非线性流变问题的基本表达式	219
§ 8.2	适用于数值计算的屈服准则—四种屈服准则的 $[H]$ 矩阵计算	222
§ 8.3	土体开挖非线性流变有限元法的实施	227
§ 8.4	14 点数值求积法的应用	232
§ 8.5	三维问题接触面的模拟	232
§ 8.6	三维非线性流变分析软件系统—TDNRAS 的总体方案研制	235

第四篇 土体工程中流变问题的应用实践

第 9 章	二维流变问题工程实例计算	245
§ 9.1	某高层住宅大楼箱基沉降分析	245
§ 9.2	某地下车库水泥搅拌桩基坑围护工程变形与稳定分析	256
§ 9.3	某地铁车站地下连续墙基坑分部开挖围护-支撑系统计算分析	261
第 10 章	三维土工流变问题的应用实践	275
§ 10.1	某深大基坑开挖-支护三维问题的计算分析	275
§ 10.2	计算假定与计算对象	275
§ 10.3	支撑预应力与开挖施工过程的力学模拟	278
§ 10.4	考虑时空效应的计算分析	291
§ 10.5	基坑开挖遇延误施工情况导致土体附加过量位移的计算	298
§ 10.6	分步开挖坑内外土层塑性区的发展规律	300
§ 10.7	井点降水土体固结沉降问题	304

§ 10.8 与按二维平面问题作线性流变计算结果的对比 304

第 11 章 某矿石堆场地基稳定、沉降与加固的三维非线性流变分析 306

§ 11.1 基本假设 306

§ 11.2 计算对象描述 307

§ 11.3 计算方案 308

§ 11.4 三维流变分析与分层总和法及与陆培炎法计算结果对比 308

§ 11.5 场区整体稳定性的时间效应分析 310

第五篇 饱和淤泥质粘土非线性流变理论的进一步分析

第 12 章 关于上海淤泥质粘土非线性蠕变的应力-应变-时间关系模型 317

§ 12.1 Singh-Mitchell 三参数应力-应变-时间函数 317

§ 12.2 对 Singh-Mitchell 模型的修正—Mesri 模型 327

§ 12.3 上海地区淤泥质粘土的蠕变试验及结果 336

§ 12.4 上海地区淤泥质粘土的 Singh-Mitchell 模型 342

§ 12.5 上海地区淤泥质粘土的 Mesri 模型 342

第 13 章 关于粘土应力-应变-时间特性的准三维本构模型 345

§ 13.1 理论基础 345

§ 13.2 模型的验证 357

第 14 章 粘性土的一维非线性粘弹塑性模型 360

§ 14.1 等效时间粘弹塑性模型 360

§ 14.2 模型的应用 364

§ 14.3 上海地区淤泥质粘土二次固结系数 ψ 的时间非线性特性 365

§ 14.4 考虑二次固结系数 ψ 时间非线性的一维固结-蠕变混合问题 366

第 15 章 软粘土蠕变与应力松弛的耦合效应 373

§ 15.1 粘土的蠕变-应力松弛耦合试验 375

§ 15.2 试验结果 376

§ 15.3 耦合试验的力学模型 378

§ 15.4 耦合问题关于应力-应变-时间关系函数的微分本构方程 379

§ 15.5 耦合问题微分本构方程的数值解 380

第六篇 岩体流变特性和分析方法

第 16 章 岩体流变的基本性质 387

§ 16.1 概述 387

§ 16.2 岩石流变的力学特性 388

§ 16.3 软岩变形发展的时间历程 391

§ 16.4 节理发育岩体的剪切蠕变 392

§ 16.5 耦合流变力学行为及研究进展 395

§ 16.6 岩体蠕变损伤、断裂问题 400

第 17 章 岩体流变的室内试验 406

§ 17.1 泥岩、砂岩蠕变室内试验 406

§ 17.2 岩体软弱夹层直剪蠕变试验 409

§ 17.3	单轴压缩条件下四种岩石的蠕变与松弛试验	411
§ 17.4	复合膨胀渗水岩体的耦合蠕变试验	416
§ 17.5	岩石蠕变断裂与时效损伤试验	425
§ 17.6	岩石蠕变损伤特性的细观试验	429
§ 17.7	脆弹粘性岩体长期力学性质试验	436
第 18 章	岩体流变分析的粘弹塑性理论与方法	459
§ 18.1	弹-粘弹-粘塑性模型—西原模型	459
§ 18.2	洞室围岩-支护系统粘弹塑性有限元法解析	461
§ 18.3	层状节理岩体蠕变特性的粘-弹塑性分析	476
§ 18.4	含软弱断层、破碎带岩体蠕变的弹-粘塑性分析	481
§ 18.5	洞室围岩-支护系统相互作用机理的时间效应与优化设计	484
§ 18.6	渗水膨胀粘弹塑性围岩压力隧洞的耦合蠕变	503
§ 18.7	考虑时间效应的围岩特性曲线	524
§ 18.8	隧洞掘进面时空效应分析的边界单元法	531
§ 18.9	岩体粘滞系数随加载应力和时间的变化规律	545
§ 18.10	岩体蠕变时效损伤、断裂分析	550
§ 18.11	岩质材料非线性流变属性及其力学模型	562

第七篇 岩体流变本构模型辨识与参数估计

第 19 章	系统辨识的基本原理	573
§ 19.1	概述	573
§ 19.2	系统辨识中的若干概念	574
§ 19.3	系统辨识的基本过程	577
§ 19.4	系统辨识的一般方法	580
§ 19.5	岩体本构模型辨识的方法与特点	581
第 20 章	复杂应力状态下岩体弹-粘弹性本构模型辨识	584
§ 20.1	弹-粘弹性模型理论概述	584
§ 20.2	弹-粘弹性模型辨识的研究现状	586
§ 20.3	弹-粘弹性模型辨识的方法	587
§ 20.4	弹-粘弹性模型辨识程序	594
§ 20.5	算例分析	595
第 21 章	复杂应力状态下岩体弹-粘塑性本构模型辨识	599
§ 21.1	弹-粘塑性模型理论概述	599
§ 21.2	弹-粘塑性模型辨识原理	602
§ 21.3	弹-粘塑性模型辨识的求解步骤	610
§ 21.4	辨识程序的结构与功能	614
§ 21.5	算例分析	620
第 22 章	本构模型辨识的应用研究	623
§ 22.1	工程监测概述	623
§ 22.2	模型类别与初步判断	626
§ 22.3	辨识的计算过程	626
§ 22.4	计算结果与分析	629

第八篇 岩体流变问题的工程应用

第 23 章 某水电站地下厂房洞室中的应用实践 637

 § 23.1 大断面地下厂房洞室围岩、支护系统粘弹塑性分析的工程应用 637

 § 23.2 考虑层状节理岩体流变效应粘弹塑性分析的工程应用 646

 § 23.3 软弱断层流变对洞室围岩粘弹塑性分析的工程应用 651

 § 23.4 复合膨胀渗水围岩有压隧洞耦合蠕变效应分析的工程应用 655

第 24 章 考虑掘进面时空效应弹-粘塑性边界元法在极软岩洞室工程中的应用实践 664

 § 24.1 弹-粘塑性边界元法在洞室掘进面时空效应分析中的应用 664

 § 24.2 考虑时空效应的反演分析及其工程应用实例 666

第 25 章 某工程船闸高边坡岩体三维粘弹塑性有限元法的应用实践 678

 § 25.1 三维粘弹塑性计算原理及其有限元法与分析软件(V3)简介 678

 § 25.2 船闸高边坡岩体的地形与工程地质条件 687

 § 25.3 闸址处数值分析中需着重研究考虑的三维问题 692

 § 25.4 船闸高边坡岩体三维粘弹塑性有限元法分析计算 694

 § 25.5 计算结论与建议 710

主要参考文献 712

致谢 716