

岩土材料的 环境效应

陈四利 宁宝宽 著



冶金工业出版社
Metallurgical Industry Press

岩土材料的环境效应

陈四利 宁宝宽 著

北 京
冶金工业出版社
2009

内 容 提 要

本书主要对各种环境作用下岩土材料的性质进行系统研究及理论分析。通过一系列不同应力、化学溶液及渗流等耦合作用过程中岩土试件的即时加载试验、CT 实时扫描试验等单轴和三轴压缩细观和宏观力学试验,分析了不同环境以及化学、渗流与应力耦合侵蚀下岩土材料的力学效应。综合运用土力学、损伤力学、孔隙介质力学、渗流理论、弹塑性力学及物理化学等理论,研究了各种环境效应下岩土材料破裂过程的非线性损伤演化规律和机理,建立了岩土的化学损伤演化变量及本构模型,提出了相应的非线性力学分析与数值模拟方法,并将上述环境效应机理研究初步应用于岩土工程。

本书可作为岩土工程领域内的科研人员及大专院校土木工程专业的研究生用书,也可供从事土木工程施工的工程技术人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

岩土材料的环境效应/陈四利,宁宝宽著. —北京:冶金工业出版社,2009.7

ISBN 978-7-5024-4952-0

I. 岩… II. ①陈… ②宁… III. 防渗混凝土—环境效应 IV. TU528.32

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2009)第 111305 号

出 版 人 曹胜利

地 址 北京北河沿大街嵩祝院北巷 39 号,邮编 100009

电 话 (010) 64027926 电子信箱 postmaster@cnmip.com.cn

责任编辑 宋 良 贾 玲 美术编辑 张媛媛 版式设计 张 青 孙跃红

责任校对 卿文春 责任印制 牛晓波

ISBN 978-7-5024-4952-0

北京兴华印刷厂印刷;冶金工业出版社发行;各地新华书店经销

2009 年 7 月第 1 版,2009 年 7 月第 1 次印刷

148mm×210mm;7 印张;207 千字;213 页;1-2500 册

26.00 元

冶金工业出版社发行部 电话:(010)64044283 传真:(010)64027893

冶金书店 地址:北京东四西大街 46 号(100711) 电话:(010)65289081

(本书如有印装质量问题,本社发行部负责退换)

前 言

当代人类工程经济活动规模不断扩大,环境对工程的影响也越来越大。岩土材料由于直接与地下水等可能溶有腐蚀性介质的环境接触,受环境影响和环境变化危害是最为严重的。分析岩土类材料在复杂环境条件下的工程性质,研究其环境效应和失效机理,合理地进行岩土工程的安全设计以及耐久性设计,已成为 21 世纪环境岩土力学研究所面临的重大课题之一。

本书汇集了著者多年的科学研究成果,从环境问题角度探讨各种环境因素对岩土材料力学特性的不同效应,研究岩土工程因环境因素的影响而发生破坏的内在机理,为更准确评估和计算岩土工程的稳定性、耐久性等提供有效的技术参数,并为今后开发和研制人工智能控制、预测以及信息管理等系统储备基础信息,因此,这些研究具有重要的理论意义和工程意义。

书中着重介绍了不同环境对岩土材料力学特性的影响,就典型岩土材料(水泥土、混凝土及岩石等)模拟了各种工程环境,进行了一系列的单轴、三轴、冻融以及细观力学试验;研究了岩土材料在破裂过程中的损伤破裂过程、演化规律和特征,进而运用物理化学分析、损伤力学、弹塑性力学、断裂力学和数值计算等理论和方法,建立相应的断裂准则、化学损伤因子和本构模型,并用神经网络等方法模拟各种环境下岩土材

料的本构关系,给出了环境侵蚀条件下岩土材料的损伤本构模型。

本书内容涉及地质学、CT技术、力学(岩石力学、断裂损伤力学、工程力学、弹性力学、流体力学和细观实验力学)、化学(化学成分分析理论、地球化学热力学、地球化学反应动力学)、人工智能科学(神经网络)等学科领域。

由于水平所限,书中疏漏和不足之处,诚请读者批评指正。

作 者

2009年4月于沈阳

目 录

1 绪论	1
1.1 岩土材料的环境效应研究背景	1
1.2 岩土材料的环境效应研究现状	3
1.2.1 水泥土环境效应研究现状	3
1.2.2 混凝土环境效应研究现状	5
1.2.3 岩石环境效应研究现状	6
1.2.4 损伤力学与岩土工程研究现状	7
1.2.5 细观力学与岩土工程研究现状	10
1.2.6 岩土本构模型研究现状	13
1.3 研究思路和方法	14
1.3.1 研究思路	14
1.3.2 研究方法	15
1.3.3 研究内容	15
2 水泥土的环境效应试验研究	17
2.1 概述	17
2.2 宏观试验方案设计与优化	18
2.2.1 侵蚀环境设计	18
2.2.2 加载装置与观测系统	18
2.2.3 水泥土试样的制备	19
2.3 环境侵蚀下水泥土的单轴压缩破裂试验	22
2.3.1 试验过程	22
2.3.2 试验结果分析	22
2.4 环境侵蚀下水泥土力学特性的时间效应	31
2.4.1 不同 pH 值对水泥土强度增长趋势的影响	32

2.4.2	不同离子浓度影响的强度增长趋势	34
2.4.3	不同化学溶液对水泥土强度增长趋势的影响	36
2.5	水泥土冻融和侵蚀的双重效应	36
2.5.1	试验材料制备与试验方案	37
2.5.2	试验结果分析	38
2.5.3	冻融循环侵蚀对水泥土力学性能的双重效应	42
2.6	环境侵蚀下水泥土的三轴压缩试验	47
2.6.1	试验设备及其原理	47
2.6.2	三轴压缩破裂试验步骤	48
2.6.3	试验结果分析	49
2.7	环境侵蚀下水泥土细观破裂过程的实时观测试验	54
2.7.1	概述	54
2.7.2	细观加载仪及其观测系统	55
2.7.3	细观实时观测试验试件的制备	55
2.7.4	水泥土的细观破裂实时观测试验	56
2.7.5	环境侵蚀下水泥土的细观破裂特征实时观测	63
2.8	小结	69
3	混凝土的环境效应试验研究	71
3.1	概述	71
3.2	试验方案设计与优化	71
3.2.1	混凝土试件的制备和养护	71
3.2.2	侵蚀和冻融试验	72
3.2.3	混凝土试样的抗压试验	72
3.3	混凝土的环境效应试验研究	72
3.3.1	纯净水养护的混凝土力学特性	72
3.3.2	酸侵蚀和冻融循环对混凝土力学特性的影响	73
3.3.3	硫酸钠侵蚀和冻融循环对混凝土强度的影响	73
3.4	动态水侵蚀环境下混凝土的环境效应	77
3.4.1	动态水侵蚀环境下混凝土的侵蚀试验	77
3.4.2	动态水侵蚀环境下混凝土的侵蚀试验结果分析	77

3.4.3 动态水侵蚀环境下混凝土的机理分析	79
3.5 环境侵蚀条件下混凝土的荷载破裂特征	80
3.6 砂浆的环境效应试验	83
3.6.1 试验方案及试件制备	83
3.6.2 试验设备	84
3.6.3 环境侵蚀条件下水泥砂浆的力学性能	84
3.6.4 不同 pH 值的溶液中水泥砂浆的单轴抗压强度 试验	87
3.6.5 不同水泥掺量的水泥砂浆冻融性质	89
3.6.6 冻融次数对水泥砂浆冻融性质的影响	90
3.7 小结	91
4 岩石的环境效应试验研究	93
4.1 概述	93
4.2 岩石细观力学试验仪器及其观测系统	93
4.2.1 岩石细观力学加载仪	93
4.2.2 岩石细观力学加载仪观测记录系统	95
4.2.3 岩样的加载装置	95
4.2.4 CT 检测理论及试验设备加载系统	97
4.3 岩石细观单轴压缩破裂过程的实时观测试验	100
4.3.1 岩样的制备	100
4.3.2 花岗岩长方体岩样力学特性的环境效应	104
4.3.3 砂岩矩形板岩样力学特性的环境效应	110
4.4 砂岩细观破裂过程的 CT 实时扫描试验	129
4.4.1 岩样的制备	129
4.4.2 试验过程	131
4.4.3 岩样的破裂过程及图像	131
4.4.4 试验结果分析	135
4.4.5 不同溶液的侵蚀效应	145
4.4.6 不同 pH 值的侵蚀效应	146
4.5 小结	148

5 岩土材料的环境损伤机理分析	150
5.1 概述	150
5.2 环境侵蚀下岩土材料表面细观损伤特征	150
5.2.1 水泥土材料的表面损伤	150
5.2.2 混凝土和砂浆材料的表面损伤	155
5.2.3 岩石材料的表面损伤	158
5.3 岩土材料的损伤演化机理分析	161
5.3.1 环境侵蚀下水泥土的宏-细观损伤机理	161
5.3.2 化学腐蚀下岩石细观损伤的化学作用分析	165
5.3.3 单轴压缩岩样的破裂特征分析	168
5.3.4 三轴压缩岩样的破裂特征分析	169
5.4 小结	170
6 岩土材料的环境损伤本构模型及应用	172
6.1 概述	172
6.2 环境侵蚀下水泥土的环境损伤本构模型	173
6.2.1 水泥土环境损伤本构模型的建立	173
6.2.2 水泥土破坏形式的损伤本构模型	176
6.2.3 损伤本构模型的应用	176
6.3 环境侵蚀条件下水泥土的神经网络本构模型	177
6.3.1 神经网络本构模型的建立	177
6.3.2 神经网络计算框图	179
6.3.3 网络模型的训练和优化	179
6.3.4 实例验证	180
6.4 环境侵蚀下岩石三轴压缩损伤演化变量及本构模型	185
6.4.1 损伤演化变量的确定	185
6.4.2 损伤演化变量分析	187
6.4.3 环境侵蚀下岩石三轴压缩损伤演化本构模型	195
6.5 环境侵蚀下岩石细观损伤的断裂力学模型	197
6.5.1 岩石断裂的理论基础	198

6.5.2 断裂准则	200
6.5.3 细观损伤的断裂分析	201
6.6 环境效应下岩土材料的工程应用	203
6.6.1 概述	203
6.6.2 水泥土搅拌桩的环境效应	203
6.6.3 喷射混凝土材料的环境效应	205
6.6.4 岩石材料的环境效应及耐久性	208
6.7 小结	209
参考文献	210

1 绪 论

1.1 岩土材料的环境效应研究背景

随着世界人口的急剧增长、人们生活水平的提高和工业化的迅速发展以及自然资源的大量消耗,人类的生存环境日益恶化,各种环境问题已经成为全球性的问题。同时,随着当代人类工程经济活动规模的不断扩大,建筑、矿山、水利等工程与环境之间的关系越发密切,它们之间互相渗透、互相影响、互相制约,加剧了工程问题的复杂性和艰巨性。另外,随着我国西部大开发战略的逐步实施,国家进行了西部的一些重大建设工程以及东北老工业基地的建设,环境对工程的影响越来越大。对于岩土类工程材料来说,由于其直接与地下水等可能溶有腐蚀性介质的环境接触,受环境影响和环境变化危害是最为严重的。因此,分析岩土类材料在复杂环境条件下的工程性质,研究其环境效应和失效机理,合理地进行岩土工程的安全性以及耐久性设计,已成为 21 世纪环境岩土力学研究所面临的一项重大课题。

目前,传统的用于分析土性的土力学原理和方法以及分析岩石类的岩石力学原理和方法已受到挑战。例如:酸雨、被周围环境因素污染的地表水和地下水均使建筑基础、地基土以及岩石等发生不同程度的变化,这就自然影响到它们的力学特性。应当指出,面对日益严重的环境地质问题,不同的学科从不同的学科体系出发、从不同的方面加以研究,因而出现了关于同一问题的不同概念或术语的现象。例如,同是“environmental geotechnology”一词,土木工程和岩土力学界将其称为“环境岩土工程”,工程地质工作者则称为“环境地质工程”。但无论怎样称谓,他们不仅重视“岩土”性质,而且还注意到它们所赋存的特定地质环境和状态。因此,从环境问题角度研究工程地质和岩土工程,改善人与地质环境的关系,将使环境岩土工程科学进入一个更深层次研究的新阶段。

近十几年来国际上已召开过一些相应的学术会议,主要有:

(1)1988 年第 28 届 IGC 大会(华盛顿),灾害与环境问题讨论成为大会的热点;

(2)1992 年第 29 届 IGC 大会(东京),人类生存与发展的环境问题成为大会的主题;

(3)1992 年 8 月地下水与环境国际研讨会(北京),着重讨论了地下水资源和环境的双重特性;

(4)1997 年 6 月,在希腊雅典召开的“国际工程地质与环境”研讨会;

(5)1998 年 3 月,在美国圣·路易斯召开的“第四届岩土工程实录国际会议”涉及了许多环境岩土工程实录研究成果;

(6)1998 年 8 月,在美国波士顿召开的“第四届国际环境岩土工程和全球可持续发展研讨会”;

(7)1998 年 9 月在葡萄牙里斯本召开的“第三届国际环境岩土工程会议”;

(8)1998 年 9 月,在波兰华沙召开的“欧洲中西部地区第四届环境污染国际讨论与展示会”,等等。

这些国际学术会议分别从工程地质学、岩土力学和岩土工程的角度去研究各种环境及其相互影响问题,从会议所列专题及讨论内容可以看出当今环境岩土工程研究的主要热点和难点问题;而且由于工程类型的庞杂、地质条件的千变万化,加上有关环境岩土工程理论还不成熟,不少岩土工程的决策不得不靠半经验、半理论的方法进行。经验在环境岩土工程研究中占有很重要的地位。可见,环境岩土工程仍然面临完善有关理论和提高技术水平等艰巨任务。

基于上述问题和思想,本书重点进行环境岩土工程的基础性研究,探讨各种环境因素对岩土材料力学特性的不同效应,研究岩土工程因环境因素的影响而发生破坏的内在机理,为更准确评估和计算岩土工程的稳定性、耐久性等提供有效的技术参数,并为今后开发和研制人工智能控制、预测以及信息管理等系统储备基础信息,因此它的研究具有重要的理论和工程实际意义。

1.2 岩土材料的环境效应研究现状

本书所提出的环境对岩土工程的影响因素主要包括水、化学溶液以及温度、冻融、压力和 pH 值等。对于上述问题及其相关领域,国内外一些学者也进行了一系列卓有成效的研究,并取得了一些研究成果。在这方面的基础性研究主要包括以下几方面:岩土工程环境效应、岩土损伤力学、岩土细观力学以及数值模拟等。

1.2.1 水泥土环境效应研究现状

水泥土是目前得到广泛重视和应用的土木工程材料之一,它是一种性能较好且比较廉价的新型建筑材料,它是依靠机械力搅拌或射流冲切,把地基(地下)的天然软土与水泥浆(或粉)按一定的比例混拌在一起形成的加固土体。由于具有性能良好、材料来源广泛、价格低廉、施工方便等优点,已广泛地应用于建筑、水利、矿山等地基基础、基坑防渗、工程防渗墙、挡土墙护坡、大坝的边坡加固、水库和浅湖的衬垫以及道路工程的路基改良加固等工程。

水泥土在国外的应用始于 20 世纪 40 年代,美国于 1945 年首次将水泥土用于一座 4.5 万 m^3 蓄水池底部的防渗,运行 23 年未发现渗漏。水泥土除用作堤坝护坡外,近二三十年来已广泛用于构筑防渗墙体。1984 年,在美国得克萨斯州活思(Worth)山附近的里奇兰·克里克(Richland Creek)坝上,修整 365m 宽的溢洪道基础底板时,用水泥土取代了大体积混凝土,把基岩层上厚约 3.0m 的沉积土挖掉后,用 9 万 m^3 水泥土进行替换。除美国外,印度、赞比亚、肯尼亚等国也大量使用水泥土作防渗料或建筑材料,这些均是水泥土的应用和发展比较早的国家。

我国水泥土的发展和应用虽起步较晚,但从 20 世纪 70 年代初开始,水泥土的发展十分迅速,例如长江科学院于 1973 年 3 月,为长江护岸工程进行了水泥土的试验研究,并会同长江流域规划办公室在荆江大堤颜家台和南岸大堤二平寺两处堤段,进行了护坡现场试验,效果比较显著,铺筑一年后观察,干缩缝细小,凿取样品的抗压强度达到 $0.88 \sim 2.27 \text{ MPa}$,比夯击干法施工的强度高一倍左右。在塞外严寒地

区的红领巾水库灌区用水泥土做的渠道防渗试验,在深圳宝安德松白公路(一级公路)和新城大道的路面结构中均采用了水泥土复合地基,在上海静安寺下沉广场围护工程和轻轨宝兴路站承台围护工程中应用了型钢水泥土复合桩等。70年代后期,山东、天津、北京、上海等省市的水利科研、设计部门相继开展了水泥土的应用研究工作,比较深入地研究了该材料的基本物理力学性能。80年代,水利部门对水泥土的研究使用更为普遍。建设部门也是在该时期采用深层搅拌技术将地基软土和水泥浆强制搅拌来加固地基,得到了具有整体性、水稳性和足够强度的地基土。1974年,辽宁省在沈抚公路南线铺筑了十余公里采用水泥土作为高级沥青面层的基层,这是我国公路建设史上第一次大规模应用水泥土的工程实例。近些年来,用水泥浆作为堤坝、围堰等防渗墙材料,取得了令人满意的结果,特别是将其用于三峡工程围堰防渗墙,在该工程中起到了重要的作用。比如,1998年特大洪水过后,国家就灾后重建工作采取了一系列重要举措,对长江流域一、二级堤防进行了大规模的除险加固,效果显著。水泥土的另一项应用是作为土木工程的软土地基加固,其形成的地基加固体,包括搅拌桩、旋喷桩等复合地基,力学性能变化范围大,其桩体从柔性、半刚性、一直到刚性,正广泛应用于土木工程各个方面。可见,水泥土材料在国内的发展和应用前景是非常乐观的,特别是在堤防防渗、水库坝基防渗、在堤围中的防渗墙以及农村水利灌溉水渠垫层等水利工程、土木工程中得到广泛应用。水泥土作为水利防渗材料已由国家水利部编入《渠道防渗工程技术规范 SL1891》中。同时有关水泥土在其他工程应用方面的研究也更加活跃,如高速公路路基、铁路路基治理、机场、港口、高层建筑地基以及基坑支护结构等等,均有相关水泥土搅拌桩等的设计和工程应用。

近十几年来,随着水泥土在水利、土木等工程领域的广泛应用,众多学者对水泥土的工程力学特性也进行了较为深入的研究,如 Fisher 和 Kawasaki Misaki 分析了在黏性土中掺入不同水泥的力学特性;郝巨涛从材料力学的角度探讨了水泥土的力学特性;王景华对水泥土的固化过程进行了微观研究;陈善民、王立忠等对水泥土动力特性进行了试验并分析了水泥土复合地基抗震特性。张天红、谭菊香、李晓目、王辉、何国荣、李智彦、汤晏平、郑刚、朱大宇、李琦、朱延忠、储诚富等众多学

者对水泥土的力学相关特性均进行了实验研究,上述众多学者的常规单轴和三轴试验取得了一定的研究成果。最近几年,对水泥土的强度理论、本构模型的研究也取得了初步成果。

1.2.2 混凝土环境效应研究现状

混凝土作为土木工程最为常用的材料,其各种工程性质的研究已经有几百年的历史了。其中混凝土在各种腐蚀环境下耐久性的研究是一项十分重要的工作。

早在1925年,在Miller领导下,美国开始在硫酸盐含量极高的土壤内进行长期试验,目的是为了获得25年、50年以致更长时期的混凝土腐蚀数据。1934~1964年间,比利时Campus对混凝土在海水中的耐久性进行了试验,提出了混凝土构筑物在自然条件下抗蚀性方面的见解。我国对受腐蚀钢筋混凝土结构的研究始于20世纪60年代初期南京水科院的钢筋锈蚀研究,对混凝土结构碳化和钢筋腐蚀等的研究始于20世纪60年代中期。20世纪80年代以来,我国以建筑科学研究院和冶金部建筑设计研究院为首开展了受腐蚀钢筋混凝土构件的研究工作,20世纪80年代初期,冶金部建研院也制作一批钢筋混凝土试件,暴露于大气环境下,10年后对这批试件进行了试验研究,主要是考虑碳化作用对钢筋混凝土结构的腐蚀。1990年以来,国家科委和国家自然科学基金委员会对受腐蚀钢筋混凝土结构耐久性的研究给予了大力的支持,中国建筑科学研究院、冶金部建筑科学研究院、西安建筑科技大学、中国矿业大学、浙江大学、郑州工业大学等单位均相继承担了相关基金项目及攻关项目的研究。1994年国家基础性研究重大项目(攀登计划B)“重大土木与水利安全性与耐久性的基础研究”的正式立项,促进了我国在受腐蚀钢筋混凝土耐久性研究方面的迅速发展,经过为期6年的研究,至2000年取得了大量的基础性研究成果,混凝土的环境效应已经在我国现行规范中有所体现,并为广大工程技术人员所接受和应用。但是,就实际应用方面来讲,这些成果还都很不完善,远不能满足实际工程中的应用的要求。目前,国内外许多研究机构和学者仍在继续广泛地进行此方面的研究工作。

1.2.3 岩石环境效应研究现状

岩石的化学腐蚀或称水或流体与岩石之间的相互作用(也称水-岩反应)研究是在20世纪70年代以后才发展起来的,在国外颇有影响的研究者是斯坦福大学的F. W. Dickson和J. L. Bichof等,他们用Dickson热液设备,在200°C和50MPa条件下,进行了玄武岩-海水反应试验;而得克萨斯A&M大学的A. Hajash、哈佛大学的M. J. Mottle和H. D. Holland等以及W. E. Sayfried和J. L. Bischoff也进行了相应的试验。在国内,曾贻善等(1984)在300°C和50MPa条件下,研究了玄武岩玻璃和钠碳酸盐溶液相互作用下次生矿物的形成和反应溶液的变化。20世纪80年代初,开始考虑了动力学因素影响的试验。如W. E. Dibble和J. M. Ppper曾在300°C和20MPa条件下,在流速为0、1mol/d和100mol/d的条件下,分析了2% NaCl溶液与流纹岩玻璃的化学反应。探讨了玻璃的溶解速率与流速的关系及流速对岩石渗透性的变化的影响。而最近十几年,化学腐蚀试验的研究得到了较快速发展,如普林斯顿大学对石英、硫酸盐、萤石、钠长石等在热液中化学动力学行为方面的研究已取得重要进展。美国洛伦斯-利弗莫尔国家实验室Knauss和Wolery等人研究了流动液体内长石的溶解作用。Chou和Wollast等也多次发表长石溶解过程的试验研究结果。最近,也有法国的Roland Hellmann、德国的Andreas Lüttge和Paul Metz等学者在这方面研究成果的报道。随后,除了利用不同性质的溶液,在不同的流速、pH值、温度、压力等条件下,与不同类型的天然岩石、矿物进行反应动力学试验研究以外,已开始进行同位素交换反应机理的试验模拟研究、生物地球化学反应动力学试验研究以及矿物表面的分子动力学模拟研究等。

近些年来,化学环境腐蚀对岩石的力学效应,已成为岩体工程研究领域中的一个重要研究课题,如B. K. Atkinson通过试验研究了HCl和NaOH溶液对石英的裂隙扩展速率、应力强度因子和应力强度系数的影响;而NaCl、CaCl₂和Na₂SO₄等溶液对于摩擦系数和摩擦强度的影响,L. J. Feucht给出了详细的讨论,其他学者也都认为环境侵蚀对摩擦变形有很大的作用;J. Dunning得出了湿润条件下的破坏韧性值比干燥

条件下的要低,裂纹扩展速度加快的结论;同时 M. G. Karfakis 和 E. Z. Lajtai 也探讨了化学环境对断裂韧性等性能的影响。

在国内,陈钢林和孙钧等讨论了水对岩石强度和变形的影响;吴海青探讨了孔隙水对岩石变形特性的影响及其工程意义;朱珍德等研究了裂隙水压力对岩体强度的效应;而谭卓英等进行了酸化环境下岩石强度弱化效应的试验模拟研究;冯夏庭教授和王咏嘉教授进行了化学腐蚀条件下花岗岩破裂过程的双抗扭声发射试验;汤连生关于环境对岩土工程的影响进行了探索和研究。冯夏庭、陈四利和丁梧秀等对化学腐蚀下岩石细观损伤破裂进行了细观和 CT 扫描试验研究。

1.2.4 损伤力学与岩土工程研究现状

损伤力学是近 20 年发展起来的一门新的学科,1958 年, Kachanov 在研究金属材料蠕变断裂时,首先引用了连续性因子和有效应力的概念。在此基础上, Rabotnov 于 1963 年提出损伤因子的概念,1977 年 Janson 与 Huit 等人提出损伤力学(damage mechanics)的新思想,随后众多国内外学者运用连续介质力学方法,基于不可逆过程热力学原理,建立起损伤力学这门学科,并取得了重大的研究成果。

所谓材料的损伤,就是材料的结构组织在外载或环境因素作用下将出现如微裂纹形成、扩展、空洞萌生、晶体位错等微细观不可逆变化,这些微细观变化将造成材料宏观力学性质的劣化。因此,材料的破坏一般是累积损伤过程,在物理上是微细观结构变化的累积过程,在力学上是宏观缺陷的产生与扩展的累积过程,这样,就造成材料的功能劣化,包括刚度、强度、韧度和稳定性以及寿命的降低等等。所以,材料损伤力学的研究在材料工程、水利工程、土木工程、机械工程、交通工程以及航空航天、地质、采矿等领域有着重要意义。

从 1980 年开始,国内外学者将损伤理论用于分析混凝土受载后的力学状态,分析混凝土结构裂缝的形成和扩展,均取得了显著的成果,用半实验半理论的方法,先后建立了混凝土机械荷载作用下单轴拉伸应力状态的各种损伤模型。较为简单而又实用的模型有:洛兰德(Loland)损伤模型、马扎斯(Mazars)损伤模型、分段线性损伤模型、分段曲线损伤模型、双线性损伤模型、指数损伤模型等。将混凝土看作各向同