



随机损伤力学与 模糊随机有限元

张我华 孙林柱 著
王 军 王亚军



科学出版社

随机损伤力学 与模糊随机有限元

张我华 孙林柱 王 军 王亚军 著

科学出版社

北 京

内 容 简 介

本书全面系统地阐述随机损伤力学与随机有限元的基本理论, 建立以模糊随机数值方法为基础的模糊随机损伤力学分析模型, 较为全面地实现对岩土工程二维、三维应力场和渗流场的模糊随机模拟. 另外, 本书还探讨岩石介质的随机损伤变异性及统计分布特征, 并提出其相应的模型.

本书可作为普通高等学校土木工程专业教材, 也可供其他专业人员作为随机损伤力学与模糊随机有限元的参考书使用, 还可供相关专业技术人员参考.

图书在版编目(CIP)数据

随机损伤力学与模糊随机有限元/张我华等著. —北京: 科学出版社, 2011
ISBN 978-7-03-031976-0

I. ①随… II. ①张… III. ①随机-损伤(力学)-研究 ②模糊数学-随机-有限元-研究 IV. ①O346.5 ②O159

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2011) 第 156489 号

责任编辑: 刘凤娟 / 责任校对: 朱光兰
责任印制: 钱玉芬 / 封面设计: 耕者设计工作室

科学出版社出版

北京东黄城根北街 16 号

邮政编码: 100717

<http://www.sciencep.com>

骏杰印刷厂印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2011 年 8 月第 一 版 开本: B5(720×1000)

2011 年 8 月第一次印刷 印张: 28 3/4

印数: 1—1 600 字数: 562 000

定价: 89.00 元

(如有印装质量问题, 我社负责调换)

前 言

非确定性理论是基础学科与应用学科的交叉, 将工程理论研究引入到一个更加广阔的空间, 尤其对岩土工程的发展产生极其深远的影响; 同时, 也对岩土工程科学技术产业化起到很大的推动作用. 利用模糊随机这类广义非确定性理论对岩土工程中的损伤问题进行研究是一个崭新的课题, 对深入认识岩土工程的损伤机理、拓展损伤力学研究领域有着积极的促进作用. 但是, 学科自身特点决定了岩土工程模糊随机广义非确定性研究是极为复杂的, 同时考虑模糊、随机、损伤的同构性并对其进行讨论进而应用于工程的范例更是少有.

在过去的七十多年时间里, 可靠度理论及非确定性分析方法得到了长足的发展, 以可靠度理论为基础的规范体系率先在结构设计领域形成, 而在岩土工程领域, 非确定性分析理论体系还不是很完整. 鉴于这种状况, 笔者结合在工程力学领域已经得到发展的损伤力学理论, 建立以随机有限元法、广义随机有限元即模糊随机数值方法为基础的模糊随机损伤力学分析模型, 对岩土工程、水工结构中普遍存在的一系列问题进行较为深入的分析和探讨.

构成本书的主要研究成果如下: 从岩土工程的广义可靠度出发基于模糊随机变分原理建立较为实用且功能性很强的一次逼近模糊概率数值模型; 从随机模拟的角度建立三维各向异性非均质稳定随机渗流场模型; 考虑材料非线性后, 基于全量理论并依据稳定黏性时间特征建立黏塑性非线性随机数值模型; 较为全面地实现对岩土工程二维、三维应力场和渗流场的模糊随机模拟; 在以上工作的基础上, 笔者探讨岩石介质的随机损伤变异性及统计分布特征; 基于分析结果, 将研究范围扩展后, 引入损伤外延的模糊论域, 指出模糊、随机、损伤的同构性, 提出模糊随机损伤的概念模型, 在随机、模糊两层数学覆盖下完成广义可靠度与损伤演变的双重分析; 从岩土工程中的基坑开挖课题出发, 提出基于增量理论的广义非确定性空间下模糊随机卸荷损伤模型, 实现基于材料非线性的广义非确定性损伤力学研究.

本书包含形成上述研究成果所完成的主要工作内容, 概述如下:

(1) 基于弹性力学边值问题的经典变分原理, 在随机空间 Ψ 上推导基于线性逼近理论的随机变分列式, 对弹性、弹塑性随机有限元实现理论和方法进行研究; 对照非线性随机有限元理论的特点, 以 Mohr-Coulomb 破坏准则下的黏性伪时间步为基础, 分别采用“关联流动法则”、“非关联流动法则”两种工况, 提出黏塑性随机本构模型; 推导并建立基于全量理论的黏塑性常刚度随机有限元列式, 形成黏塑性随机有限元数值计算模型; 就堤坝填筑问题的非线性随机工程特性进行分析, 对土方

填筑过程中的随机黏塑性应变、随机应变率数字特征、位移及应力非线性随机矢量场的空间变异性等广义非确定性作深入研究分析;考虑“有侧限”问题情况下膨胀角 ψ 的影响,利用黏塑性非线性随机有限元数值模型就施工期孔隙水压消散缓慢条件下的地基承载力进行分析研究,对非线性变载条件下地基中随机有效应力与随机孔隙水压的发展演变及数字特征、承载力的可靠指标空间分布和发展进行探讨研究,形成随机损伤力学的理论基础。

(2) 基于模糊分解定理建立模糊空间 $\Xi(\tilde{C}, \tilde{L}, \tilde{P})$ 上的模糊变分理论,依据扩张原则在广义非确定性空间 $O: \xi(s, f)$ 上提出模糊随机变分列式;由随机变分列式在经典随机有限元理论基础上,建立线性一次逼近随机有限元模型,对非均质各向同性岩土工程结构在没有优势方向不连续面情况下的局部破坏概率进行分析;通过对岩土工程结构安全储备作模糊软化处理,构造关于岩土工程结构安全状态论域 M 的三种隶属度函数,基于模糊随机变分并依据扩张原则建立岩土工程结构局部破坏的模糊随机失效模型;在此基础上对荆南长江干堤堤身可靠度进行讨论,奠定模糊随机损伤力学的理论基础。

(3) 基于随机数学模拟,提出渗流场随机统计分布模型,分析在土性参数、边界条件等随机影响因素下渗流场水头势的统计分布特征;结合蒙特卡罗(Monte Carlo)模拟,建立三维各向异性非均质稳定随机渗流场模型;依据堤防区域内土层地质结构空间分布特性,对截渗墙、导渗沟等复杂边界对渗流场的随机干扰和堤防的随机渗透破坏进行分析讨论,提出三维各向异性非均质稳定随机渗流场敏感性分析模型;在此基础上结合荆南长江干堤隐蔽工程对三维各向异性非均质稳定随机渗流场统计分布及敏感性分析模型进行数值验证,所得研究成果成为渗透破坏诱发性随机损伤研究的理论基础。

(4) 以岩石介质为依据,探讨岩质材料裂纹开展的各向异性及随机分布特征之间的内在联系;通过对模型试件作统计分析,基于 Weibull 函数建立岩石材料裂纹长度的分布函数模型,基于高斯(Gauss)分布函数建立岩石材料裂纹角度 ν 累积分布函数和概率密度函数模型;利用 Monte Carlo 统计仿真生成岩石样本三个表面上的裂纹长度和方向角的柱状值与概率分布曲线,并借助于 K-S 检验证明在置信区间 $\alpha < 0.1$ 上,各向异性随机损伤变量符合 Beta 分布,从而基于裂纹仿真的统计信息提出岩石材料各向异性随机损伤变量的累积分布方程和概率密度方程;在各向异性随机损伤材料的无量纲损伤弹模基础上,提出可用于估计岩体中随机损伤变量统计值的随机数字特征;基于试验物理模型建立岩石损伤模型的有效弹性模量随机数字特征以求解随机损伤变量的平均值和标准偏差,从而可以对各向异性随机损伤分布特征进行分析研究;利用 Rosenblueth 方法并结合统计学理论和有限元技术实现对岩石材料各向异性随机损伤场的数值模拟。

(5) 在各向异性随机损伤统计模型基础上进一步分析模糊、随机、损伤三者

[0,1] 区间上的一致性, 基于损伤变量的广义非确定性提出模糊随机损伤概念模型; 在分析损伤变量本质的基础上, 构造并解释三类损伤变量模糊数, 即降半分布、“秋千”分布、组合“秋千”分布, 提出实现模糊随机损伤的模糊自适应理论; 依据扩展原则在随机损伤模型基础上建立三维弹性模糊随机损伤本构模型, 并借助模糊随机变分原理在模糊工作状态论域基础上将损伤力学进行扩展, 推导建立广义弹性模糊随机有限元算法; 探讨模糊随机损伤变量的同时分析损伤变量的随机分布特性及程序实现原理, 借助正交设计原理及当量正态理论, 实现模糊随机有限元可靠度分析与模糊随机损伤的同步分析; 在三维弹性模糊随机损伤力学理论的基础上, 进一步考虑岩土材料的非线性模糊随机损伤特性, 分析开挖卸载导致的土体损伤特性, 明确基坑的损伤演变也是建立在一个广义非确定性空间 $O: \xi(s, f)$ 上的模糊随机损伤演化过程; 定义平面应变下各向异性模糊随机初始损伤变量, 进而定义模糊随机初始损伤有效张量; 把卸除单元看做是“损伤源”, 得到凝聚损伤荷载矢量 $\{P\}$, 采用模糊衰减模型构造模糊随机损伤增量方程; 为了构造损伤刚度矩阵及模糊随机损伤切线刚度矩阵, 提出损伤矢量极限值 $\{\Omega_u\}$, 根据 Sidoroff 的弹性能量假设和 Lemaitre 等效应变假设, 提出黏塑性模糊随机卸荷损伤本构模型和黏塑性模糊随机损伤变化率方程, 建立较为完整的基坑开挖卸载的黏塑性模糊随机损伤力学概念模型及基础理论框架。

本书是在温州大学土木建筑工程学院的大力支持和协助下撰稿完成的。本书所包含的研究成果是在国家自然科学基金(50379046)和教育部博士点基金(A50221)资助下完成的。书中所有内容的数值算例结果均是由张我华教授的博士研究生王亚军等利用自主开发的数值计算程序(SPFSGR, MCSSFPT (MCSSFC), SDS, SUDFBC, FSDD3, FEFSD)独立完成。

本书所述课题在研究过程中, 有幸得到浙江大学曾国熙教授、丁皓江教授、陈云敏教授、金伟良教授、蔡袁强教授、金贤玉教授、龚晓南教授、谢康和教授、唐晓武教授、凌道盛教授、尚岳全教授等同仁的关照, 同时中国长江科学院吴昌瑜教授、任大春教授级高工为本书的研究工作提供了许多建议及部分极为宝贵的工程资料, 在此一并表示诚挚的谢意。

由于作者水平有限, 书中不当之处敬请读者批评指正。

张我华 孙林柱 王 军 王亚军

2010年6月于温州大学

目 录

前言

第 1 章 综述	1
1.1 随机有限元法在岩土工程中的应用	1
1.2 广义模糊随机有限元法的应用	2
1.3 损伤力学及非确定性损伤理论的研究概况	4
1.4 本书主要内容	4
参考文献	7
第 2 章 广义变分原理及随机有限元理论	12
2.1 经典变分原理与能量泛函极值问题	12
2.1.1 最小势能原理与协调模型	12
2.1.2 最小余能原理与平衡模型	15
2.2 广义随机变分原理	18
2.3 随机有限元理论基础	20
2.3.1 弹性力学随机有限元方法	20
2.3.2 弹塑性力学随机有限元方法	27
2.3.3 基于黏塑性理论的随机有限元法研究	40
2.4 数值模型的工效及工程应用	47
2.4.1 堤防填筑工程的数值模拟方法	47
2.4.2 填筑工程的数值模型应用工效	48
2.4.3 施工期地基承载力的数值分析模型	61
2.4.4 施工期地基承载力的数值分析结果	63
2.5 本章小结	93
参考文献	94
第 3 章 基于一次逼近理论的模糊随机数值方法及其应用	98
3.1 引言	98
3.2 模糊随机广义变分原理	98
3.3 线性一次逼近模糊随机有限元基本理论及模型	103
3.4 模糊随机有限元分析的工程实例	107
3.4.1 非均质各向同性边坡局部破坏的本构模型	107
3.4.2 非均质各向同性边坡模糊随机失效模型	109

3.4.3 荆南长江干堤堤身可靠度的随机有限元分析	111
3.5 本章小结	117
参考文献	118
第 4 章 三维随机渗流场分析及参数敏感性研究	120
4.1 引言	120
4.2 各向异性非均质三维随机渗流场分析模型	121
4.3 荆南长江干堤渗流场的随机特性分析	123
4.3.1 随机性描述与检验	123
4.3.2 堤防渗透变形及破坏特征分析	131
4.3.3 干堤抗渗措施及边界条件的随机特性	133
4.4 荆南长江干堤随机渗流场敏感性分析	139
4.4.1 堤防渗透系数的敏感性分析	139
4.4.2 随机边界条件的敏感性分析	141
4.5 本章小结	144
参考文献	144
第 5 章 各向异性随机损伤力学研究及其应用	147
5.1 引言	147
5.2 岩体各向异性随机损伤力学概要	149
5.2.1 岩体的随机损伤状态概述	149
5.2.2 岩石各向异性损伤张量	150
5.2.3 各向异性主损伤模型	153
5.3 岩体裂纹的统计特性	159
5.4 岩体随机各向异性损伤的统计模拟	163
5.4.1 基于统计学的岩体裂纹仿真	163
5.4.2 随机数的 Beta 分布	166
5.4.3 岩体损伤变量的概率分布仿真	167
5.5 随机矩阵的统计估计方法	169
5.6 各向异性随机损伤变量的统计估计	170
5.7 各向异性随机损伤材料的统计估计	173
5.8 由检测数据确定随机损伤特性	176
5.9 随机损伤问题的常规有限元统计分析	177
5.10 数值算例	179
5.11 工程应用实例	187
5.12 本章小结	194

参考文献	196
第 6 章 混凝土结构细观随机断裂损伤力学及其应用	199
6.1 引言 —— 基本观点	199
6.2 确定性弹塑性损伤本构模型的推广	202
6.3 细观损伤物理模型与损伤变量描述	205
6.4 基于细观的随机损伤变量的定义	207
6.5 基于细观的随机损伤本构关系	209
6.5.1 单轴受拉随机损伤本构关系	209
6.5.2 单轴受压随机损伤本构关系	210
6.5.3 双轴拉-压荷载组合时的随机损伤本构关系	211
6.5.4 混凝土随机损伤本构关系试验验证	212
6.6 单轴压缩岩石损伤统计本构模型	213
6.6.1 岩石强度的统计特性	213
6.6.2 岩石损伤的统计本构模型	213
6.6.3 统计参数 F 、 m 的确定	215
6.6.4 统计参数 F 、 m 的物理意义	216
6.6.5 岩石损伤统计本构模型的试验验证	217
6.7 基于 Poission 梯度效应的细观随机损伤模型	218
6.7.1 混凝土双轴拉-压的 Poission 梯度效应	218
6.7.2 混凝土的 Poission 梯度损伤本构方程模型	220
6.7.3 结论性概括	222
6.8 随机载荷下损伤积累的动力学演化模型	223
6.8.1 随机积累损伤概念介绍	223
6.8.2 随机损伤积累模型	224
6.8.3 数值模拟和结果讨论	228
6.8.4 随机性对固体中裂纹的损伤积累的影响	232
6.9 亚均质固体介质中的细观随机损伤模型	241
6.9.1 关于亚均质固体介质损伤问题的引述	241
6.9.2 亚均质固体中随机损伤变量的描述	242
6.9.3 损伤亚均质固体的随机本构方程	247
6.9.4 亚均质固体的随机损伤问题小结	250
6.10 统计损伤力学的极值理论	250
6.10.1 网格缺陷模型的统计模拟	251
6.10.2 统计模拟结果的概率处理及极值理论	255

6.10.3	统计模拟结果的精度和收敛性	262
6.10.4	统计损伤模型的应用与评论	263
6.11	细观损伤随机夹杂场的建模理论	265
6.11.1	含损伤弹性介质的随机夹杂场理论	265
6.11.2	有效场统计矩的构造方法	268
6.11.3	理论模型的应用 —— 椭圆状裂纹的解	270
6.12	混凝土结构非线性断裂损伤的 Markov 概率分析	272
6.12.1	结构非线性随机反应演化问题的概述	272
6.12.2	结构非线性随机反应的概率密度演化描述	273
6.12.3	结构随机非线性状态转移分析	276
6.12.4	混凝土结构非线性随机演化的 Markov 概率分析实例	280
6.13	随机损伤结构反应概率密度演化分析的切球选点法	285
6.13.1	再论结构非线性随机反应概率演化问题	285
6.13.2	随机损伤结构反应分析的密度演化方法	287
6.13.3	随机损伤变量空间选点的切球法	290
6.13.4	分析算例	295
6.13.5	评论	300
6.14	随机统计介观损伤力学理论基础	300
6.14.1	基于统计介观损伤力学的近代统计破坏力学	300
6.14.2	非平衡统计断裂力学	303
	参考文献	304
第 7 章	模糊随机损伤力学研究及模糊随机损伤有限元应用	312
7.1	引言	312
7.2	基于模糊自适应理论的弹性随机损伤模型	312
7.2.1	损伤变量的随机性和模糊性	313
7.2.2	损伤变量模糊数构造	313
7.2.3	损伤变量的随机特性	316
7.2.4	自适应模糊随机损伤本构模型	319
7.2.5	自适应模糊随机分析算法模型	324
7.3	当量正态理论下模糊随机损伤有限元的微分验算点法实现	329
7.4	模糊自适应弹性随机损伤力学计算格式	332
7.5	模糊自适应随机损伤有限元的工程数值模型应用	335
7.5.1	尖山铁矿数值分析模型	335
7.5.2	荆南长江干堤数值分析模型	349
7.5.3	龙滩重力坝的数值分析模型	353

7.6 黏塑性模糊随机损伤模型	360
7.6.1 平面应变下各向异性初始损伤变量的定义	360
7.6.2 黏塑性损伤增量方程的模型	363
7.6.3 模糊随机损伤本构模型	371
7.6.4 黏塑性损伤变化率的定义	385
7.7 工程数值模型的分析应用与工效	390
7.7.1 基坑工程的随机特性及模糊随机损伤机理	390
7.7.2 基坑开挖过程的模糊随机损伤有限元分析结果	392
7.7.3 模糊随机损伤模型对基坑开挖过程分析的工效	413
7.8 本章小结	415
参考文献	417
附录 1 主要符号说明	420
附录 2 彩图	435

第1章 综 述

1.1 随机有限元法在岩土工程中的应用

自 1925 年 Terzaghi 所著的《土力学》问世至今,岩土力学已经经历了由古典土力学到现代土力学的伟大跨越. 2004 年国家自然科学基金委员会工程与材料学部在北京召开了建筑、环境与土木工程学科发展战略研讨会,岩土工程分组的 40 多位专家提出了“十一五”期间岩土工程学科发展的途径,标志着我国岩土工程的发展已经走在了学科世界前沿^[1]. 与此同时,目前我国正处在一个大规模基础设施建设时期,这为岩土工程的发展在客观上提供了广阔的发展空间,分析计算模型层出不穷,但现有的绝大多数岩土工程规范分析手段还停留在确定性分析阶段. 由于岩土介质固有的随机离散性、施工修建技术的复杂性、工程环境的多变不可预知性^[1],这种确定性分析模型已经无法满足人们对认知客观世界“精益求精”的要求,也和人类对工程安全性越来越高的要求拉开距离. 寻求一条岩土工程“精细性”研究的发展途径势在必行.

以概率统计为基础的随机数值分析理论成为实现岩土工程定量分析的重要工具.

1947 年, A. M. Freudenthal 发表了论文《结构的安全度》,开始集中讨论结构设计可靠度问题^[2];同时期的 A. P. Ржаницын 提出了一次二阶矩理论的基本概念和计算结构失效概率的方法及对应的可靠指标公式,但只限于随机变量完全为正态分布条件下的古典可靠度理论^[3]; C. A. Cornell 等于 1969 年建立了结构安全度的二阶矩模式^[4,5]; N. C. Lind 等于 1971 年采用分离函数方式将复杂的可靠指标计算用简单易于被工程设计人员掌握接受的分项系数形式表示^[6,7]; A. H. S. Ang 提出了广义可靠度概率法^[8,9],他同 W. H. Tang 合著的《工程规划和设计的概率概念》成为一部结构概率分析的经典著作^[10]; Rudiger Rackwitz 和 Bernd Fiessler 提出的二阶矩模式于 1976 年被国际结构安全度联合委员会 (JCSS) 采用^[11],至此,二阶矩模式的结构可靠度表达式与设计方法开始进入实用阶段.

随着概率分析手段在电子工业、航空航天、机械工程、结构工程中逐步推广,到 20 世纪 70 年代后期,可靠度理论率先在岩土工程的边坡稳定分析中得到尝试性运用,从而拉开了岩土工程非确定性分析的序幕, H. H. Einstein 等^[12]、P. Morriss 等^[13]、W. P. H. Wirching 等^[14]、G. B. Beacher 等^[15]、D. R. Pitean 等^[16]、D. R. Brown 等^[17] 在自己的著作里论述了概率方法在岩质边坡中的应用, R. N. Chowdhury

等^[18,19]和 V. U. Nguyen 等^[20,21]对矿山排土场的可靠性及土质边坡的长期累积破坏的研究是岩土工程随机分析最有代表性的工作之一;其中, M. Shinozuka^[22]和 H. Astill^[23]提出的 Monte Carlo 随机有限元法为岩土工程概率分析的随机有限元实现提供了一条“多快好省”的捷径,可以使得现有的绝大部分岩土工程确定性数值模型在最短的时间内实现随机概率分析的升级;“真正”的随机有限元法被认为是由 B. Cambou^[24]提出并被 B. A. Dendrou 等^[25]、E. N. Houstis 等^[26]、T. S. Ingra 等^[27]在岩土工程非确定性分析时使用的 Taylor 展开法随机有限元 (TSFEM)。

不可否认,随机有限元法在岩土工程中的应用必须要面对许多“困难险阻”,岩土材料的空间变异性、各向异性、非连续性、多孔介质渗流弥散性都会导致岩土工程随机有限元模型计算工作量增加、难度提高,但国内外学者还是知难而上, E. Vanmarcke 等^[28~30]、Kishii 等^[31]、包承纲等^[32]、高大钊^[33]、龚晓南^[34]、姚耀武等^[35]在基础沉降、地基承载力和稳定可靠度、边坡及围岩稳定的可靠度分析等方面做了许多杰出的研究工作,笔者也就岩土工程中的若干概率分析问题作了深入的探讨^[36,37]。目前, Taylor 展开随机有限元、摄动随机有限元 (PSFEM)、Neumann (纽曼) 展开随机有限元 (NSFEM)、梯度计算与有限元结合的随机有限元梯度法 (GSFEM)、随机有限元直接偏微分法 (DSFEM)、局部平均随机场理论等许多随机有限元数值模型正越来越多地在岩土工程分析领域中发挥着重要作用。

1.2 广义模糊随机有限元法的应用

诚如 1.1 节所说,采用概率统计方法对岩土工程进行分析可以较为全面地反映工程客观实际中存在的随机离散性,但这些还不是岩土工程非确定性分析的全部。

在实际工程问题处理过程中,有些数据和概念由于人们对其本质认识上的模糊性,以至于用某一个具体的数值来精确描述表达相当困难。

以 Mohr-Coulomb 准则为例,用来描述结构安全程度的功能函数为如下形式:

$$g = c \cos \varphi - \sigma_m \sin \varphi - J_2 \left[\sin \left(\frac{\pi}{3} - \theta \right) + \frac{\sin \varphi}{\sqrt{3}} \cos \left(\theta - \frac{\pi}{3} \right) \right] \quad (1-1)$$

岩土工程规范分析方法认为 $g=0$ 时,岩土体达到临界状态,一旦式 (1-1) 使得数据进一步削减,哪怕只是 10^{-4} 数量级的下降,都会认为岩土体结构已经失效。

显然这是比较牵强的。可以肯定的是,绝大多数岩土体结构失效与否并非是以 $g=0$ 为划分依据的。以边坡工程为例,很多边坡结构在区域土体可靠指标已经达到 10^{-2} 左右的情况下仍然处于稳定状态,如我国长江流域沿线的堤防工程,虽然在 1998 年大洪水后已经进行了大规模的加固防护,但由于许多地段堤坝的地质条件复杂,导致堤身部位填筑土体的可靠指标都比较小,有些区域土体的可靠指标在

10^{-1} 以下, 经对部分重点防护区域的堤身边坡可靠度作参数敏感性分析发现, 边坡稳定对参数 c 的敏感性最高, 在其他变量的变异保持为 0.1 的前提下, c 的变异系数由 0.1 增加到 0.2, 对应的可靠指标会由 0.6698 削减为 0.5820, 可是由于堤防体系保持完整, 在年平均设计洪水位下江水深泓线相对稳定、水势摆动不大, 所以目前沿线大规模的脱坡现象并不突出^[38~41]。相反, 在另外一些情况下, 比如土体结构内部已经形成贯通滑裂面的时候, 结构系统整体的功能函数可能还远未达到 $g = 0$ 的情况, 但结构也会出现滑塌破坏。以加拿大特朗斯康谷仓失稳为例, 该结构由 65 个圆柱形筒仓组成, 其下为钢筋混凝土片筏基础, 厚 2m, 结构整体的稳定性是比较高的, 但当装谷物达到 27 万 kN 后, 发现谷仓明显失稳, 24h 内西端下沉 8.8m, 东端上抬 1.5m, 整体倾斜 $26^{\circ}53'$, 事后进行勘查分析, 发现基底之下为厚 10 余米的淤泥质软黏土层。地基的极限承载力为 251kPa, 而谷仓的基底压力已超过 300kPa, 从而造成地基区域土体的整体滑动破坏, 基础底面以下一部分土体形成滑动通道, 向侧面挤出, 使东端地面隆起。

综上所述, 岩土工程分析中, 结构的模糊性也是很重要的影响因素之一, 甚至比随机离散性更加普遍和突出, 因为有些数据由于人们对其认识上的模糊性, 用某个数值来精确表达是很困难的, 比如上述提到的岩土体结构的安全或者失效的状态、结构的许用应力、结构的土性参数以及对某些外荷载等级的划分等。所有这些都说明, 在对岩土体结构进行分析讨论时引进模糊集理论, 是一种能够更加接近描述工程对象真实工作行为的新的分析方法。

应用模糊数学处理可靠性问题始于 1975 年 A. Kaufmann 的工作^[42]。20 世纪 80 年代, 国内外不少学者逐渐认识到常规可靠性设计理论的局限性, 开始探索如何将模糊数学应用于结构可靠性分析中来, 对模糊可靠性设计理论的发展起到了推动作用。1979 年, W. Gawronski 提出了模糊有限元的概念^[43], 之后在包括岩土工程在内的许多学科内模糊集理论的研究应用开始越发深入与广泛^[44~47]; I. Elishakoff 总结了 1998 年以前的有关工作, 论述了有关模糊随机有限元方面的研究进展和应用情况^[48], S. S. Rao 等在研究了模糊有限元方法的理论和方程式后, 提出用区间数求解模糊有限元的方法, 并给出了若干算例^[49]; S. Valliappan 等在前人工作的基础上, 提出了用于土壤基础分析的模糊有限元的工程方法^[50]; Aehintya Haldar 等则认为对在役结构的剩余寿命进行评估时, 应该同时考虑模糊和随机因素的影响, 提出利用熵作为一个中间量处理结构模糊随机有限元的计算问题^[51]; 国内禹智涛、吕恩琳、王彩华等也对模糊有限元提出了二阶摄动法的有限元方法^[52], 可以避免求解区间方程的麻烦。

在模糊随机有限元法实现的过程中, λ 截集法是最常用也是最可靠的一种思路, 此方法以区间数的运算法则和模糊分解定理为基础, 采用 λ 水平截集将所分析结构的模糊随机有限元方程转化为区间方程, 然后根据区间数的运算法则对方程进

行求解.

1.3 损伤力学及非确定性损伤理论的研究概况

作为工程力学的重要组成部分, 损伤力学的发展值得关注. 最初的损伤力学在土木工程中的应用主要集中于对混凝土结构的损伤检测、岩石类介质的脆性损伤. 针对现代岩土工程越来越复杂的研究对象, 涌现出了以光纤测试技术、失域反射法 (TDR) 技术等为代表的现代信息和监测技术, 采用多参量、多传感组件、数据智能输出与动态管理方法实现对结构体的实时损伤识别、定位模型修正、现场灾变条件的实时检测、健康诊断、安全预警和可靠性预测^[1]. 对结构的损伤进行数值模型分析的手段也在不断发展, 笔者在自己著作中对岩石、混凝土介质结构体系的损伤演变、动力损伤发展、岩石裂隙孔压作用下的损伤模型作了极为深入的探讨研究^[53~58], 沈珠江在其研究成果里就重塑土结构破坏过程给出了相应的弹塑性损伤模型^[59,60].

但是, 正如笔者著作中所讲到的, 岩土体材料的损伤演变是极其复杂的, 无论是岩石类介质的裂隙、节理形成, 还是结构性重塑土的扰动破损, 都具有明显的随机性, 而损伤概念又是模糊的, 所以, 笔者在自己的相关著作中开创性地将岩石类介质的损伤模型和损伤的随机特征结合起来^[61,62], 提出并论证了损伤变量服从 β 分布的命题, 为损伤力学在岩土工程中发展指出了一条崭新的途径, 做出了具有开创性的贡献.

1.4 本书主要内容

本书在前人基础上, 尤其是结合笔者的一些研究工作在岩土工程的模糊随机广义可靠度及模糊随机损伤方面做了如下一些工作.

(1) 在经典变分原理下弹性力学边值问题基础上定义了随机空间 Ψ :

$$\Psi: \bigcup_{\alpha \in \{X\}} A_{\alpha} \subset \Psi \quad (\alpha \in \{X\} = \{x_1, x_2, \dots, x_n\}) \quad (1-2)$$

推导了基于线性逼近理论的狭义随机变分列式; 分析了三类广义模糊性, 即材料参数取值的模糊性、外荷载的模糊性、位移约束的模糊性, 也即 $\tilde{C}$ 、 $\tilde{L}$ 、 $\tilde{P}$, 建立了模糊空间 $\Xi(\tilde{C}, \tilde{L}, \tilde{P})$, 从而给出论域 Γ 上的 λ 水平截集下的样本空间 $V(C, L, P)_{\lambda}$:

$$V(C, L, P)_{\lambda}: \{\{U\}_{\lambda}, \{e\}_{\lambda}, \{\sigma\}_{\lambda}, \{f\}_{\lambda} | \lambda \in [0, 1]\} \quad (1-3)$$

并结合基于模糊分解的模糊变分理论, 定义了由 s 子空间覆盖的随机变量及由 f 子空间覆盖的模糊变量组成的广义非确定性空间 $O: \xi(s, f)$, 推导并给出了模糊随

机有限元的变分列式:

$$[K]^{s,f} \{U\}^{s,f} = \{R\}^{s,f} \quad \{U\}^{s,f}, \{e\}^{s,f}, \{\sigma\}^{s,f}, \{f\}^{s,f} \subset O: \xi(s, f) \quad (1-4)$$

(2) 推导了线性一次逼近随机有限元的数值列式, 并就所建立的非均质各向同性边坡体模糊随机失效模型给出了如下三种模糊数学模型, 对荆南长江干堤堤身可靠度进行了模糊随机广义可靠度分析.

降半 Γ 分布

$$\mu_{\underline{M}}(Rs) = \begin{cases} 1, & Rs \leq -0.08 \\ e^{-8.66(Rs+0.08)}, & Rs \geq -0.08 \end{cases} \quad (1-5)$$

降半正态分布

$$\mu_{\underline{M}}(Rs) = \begin{cases} 1, & Rs \leq -0.08 \\ e^{-108.3(Rs+0.08)^2}, & Rs \geq -0.08 \end{cases} \quad (1-6)$$

降半梯形分布

$$\mu_{\underline{M}}(Rs) = \begin{cases} 1, & Rs \leq -0.08 \\ \frac{0.5 - Rs}{0.5 + 0.08}, & -0.08 < Rs \leq 0.5 \\ 0, & 0.5 < Rs \end{cases} \quad (1-7)$$

(3) 把随机渗流场表示为如下的随机过程数学模型:

$$\left\{ [K]_0 + \sum_{j=1}^M [K]_j \xi_j(\theta) \right\} \{H\}(\theta) = \{F\} \quad (1-8)$$

从实际工程应用的角度出发基于渗流场的随机特性建立了三维各向异性非均质稳定随机渗流场模型, 分别就堤防区域内土层地质结构特性、截渗墙、导渗沟等复杂边界对渗流场的随机干扰和堤防的随机渗透破坏作了分析讨论, 在此基础上实现了对长江荆南干堤随机渗流场敏感性较为全面的分析.

(4) 总结了非线性随机有限元的发展成果, 在 Zienkiewicz 和 Corneau 等的研究基础上, 以如下 Mohr-Coulomb 破坏准则下的黏性伪时间步为基础:

$$\Delta t = \frac{4(1+v)(1-2v)}{E(1-2v+\sin^2\varphi)} \quad (1-9)$$

推导并建立了基于全量理论的黏塑性常刚度随机有限元列式, 形成了黏塑性非线性随机有限元数值计算模型, 继而就堤坝填筑问题进行了分析; 考虑“有侧限”问题情况下膨胀角 φ 的影响, 分别采用了“关联流动法则”、“非关联流动法则”两种工

况, 利用黏塑性非线性随机有限元数值模型就施工期孔隙水压消散缓慢条件下的堤基承载力进行了分析研究, 并给出了如下孔隙水压随机数字特征分布列式:

$$\begin{aligned}\text{Var}[u^p] &= E\left(\{E[x_i] - \bar{x}_i\}^2\right) = E\left\{\left[\sum_{k=1}^n (x_k - \bar{x}_k) \left(\frac{\partial u^p}{\partial x_k}\right)\right]^2\right\} \\ &= \sum_{k=1}^n \sum_{l=1}^n \left(\frac{\partial u^p}{\partial x_k}\right) \left(\frac{\partial u^p}{\partial x_l}\right) E[(x_k - \bar{x}_k)(x_l - \bar{x}_l)] \\ &= \sum_{k=1}^n \sum_{l=1}^n \left(\frac{\partial u^p}{\partial x_k}\right) \left(\frac{\partial u^p}{\partial x_l}\right) \text{Cov}[x_k, x_l] \quad (\alpha \in \{X\} = \{x_1, x_2, \dots, x_n\}) \quad (1-10)\end{aligned}$$

(5) 提出并建立了模糊随机损伤的概念模型, 在分析了损伤变量的本质基础上, 构造并解释了如下三类损伤变量模糊数, 提出了实现模糊随机损伤的模糊自适应理论.

降半分布

$$\Omega = \begin{cases} 1, & 0 < \varpi \leq 0.6 \\ \frac{1.5 - \varpi}{1.5 - 0.6}, & 0.6 < \varpi \leq 1.5 \\ 0, & 1.5 < \varpi \end{cases} \quad (1-11)$$

“秋千”分布

$$\Omega = \begin{cases} 1, & 0 < \varpi \leq 0.44 \\ 1.5 - e^{-(\ln \varpi)^2}, & 0.44 < \varpi \leq 2.33 \\ 1, & \varpi > 2.33 \end{cases} \quad (1-12)$$

组合“秋千”分布

$$\Omega = \begin{cases} 1, & 0 < \varpi \leq 0.44 \\ 1.5 - e^{-(\ln \varpi)^2}, & 0.44 < \varpi \leq 1 \\ 1.5 - \varpi, & 1 < \varpi \leq 1.5 \\ 0.996 - e^{-2[\ln(\varpi - 0.45)]^2}, & \varpi > 1.5 \end{cases} \quad (1-13)$$

避免求解区间方程, 使得数值计算的收敛速度加快, 同时又不必作摄动分析, 模糊随机数值计算不走弯路, 探讨模糊随机损伤变量的同时分析了损伤变量的随机分布特性及程序实现原理, 借助正交设计原理及当量正态理论对服从 β 分布的随机损伤变量进行处理, 实现了模糊随机有限元可靠度分析与模糊随机损伤的同步分析, 在如下随机损伤切线刚度矩阵基础上形成了完整的自适应模糊随机损伤本构模型:

$$[k]^{E*} = \iiint_{\tau} [B]^T [D^*]_E^s [B] d\tau = \iiint_{\tau} [B]^T \frac{\partial [D^*]}{\partial E} [B] d\tau$$