

王亚军 吴昌瑜  
任大春 程展林 著

# 岩土工程非确定 理论研究和应用



科学出版社

# 岩土工程非确定理论研究与应用

王亚军 吴昌瑜 任大春 程展林 著

国家自然科学基金(51109118)、  
浙江省自然科学基金(LY14E090001) 联合资助

科学出版社

北 京

## 内 容 简 介

本书全面系统地阐述了岩土及水利工程中的非确定问题,建立了堤防工程风险决策与安全特性综合评判模型,定义了边坡体的模糊随机失效概率,研究开发了边坡工程的模糊随机可靠度算法,较为全面地实现了对岩土及水利工程中非确定性问题的仿真模拟,另外,本书还探讨了岩土工程大区域随机渗流场及防渗反滤设施的模糊随机可靠度,并提出了相应的理论模型。

本书可作为普通高等学校土木及水利工程专业的研究生教材,也可供其他专业人员作为岩土工程非确定理论与应用的参考书使用,还可供其他相关专业技术人员参考。

### 图书在版编目(CIP)数据

岩土工程非确定理论与应用 / 王亚军著. —北京:科学出版社, 2014. 10

ISBN 978-7-03-042296-5

I. ①岩… II. ①王… III. ①岩土工程—研究 IV. ①TU4

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2014)第 251194 号

责任编辑:孙伯元 / 责任校对:张怡君

责任印制:肖 兴 / 封面设计:陈 敬

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>

新科印刷有限公司 印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

\*

2014 年 10 月第 一 版 开本:720×1000 1/16

2014 年 10 月第一次印刷 印张:16 1/2

字数:320 000

定价:88.00 元

(如有印装质量问题,我社负责调换)



## 前 言

在岩土工程及水利工程中,由于研究对象具有诸如材料物理力学性态及工作运行环境等方面的复杂性,长期以来占主导地位的一直是各种确定性分析方法。确定性分析处理问题十分便利,但由于这一方法往往将各种实际工程对象存在的非确定性简化,甚至忽略,所得到的结论会趋于简略、片面。针对确定性分析方法的局限性,本书以岩土工程及水利工程的非确定性分析为主线,基于模糊及随机数学理论,分析了相关工程及科学研究方面客观存在的各种非确定性,并且就若干具体工程问题作了系统的研究与探讨。具体内容如下。

(1)分析了堤防系统的安全特性,指出了系统具有的层次性及动态性,在引入层次分析法 AHP 以及模糊一致理论的基础上,系统阐述了模糊一致空间的完备性,依据具体工程课题建立了堤防岸坡系统的风险评价结构模型,同时还针对堤防工程堤身岸坡体系的风险性进行了决策分析。

(2)通过构造隶属度函数,对堤防工程堤身系统的安全特性进行量化研究,并建立了相应的基于水、土两相系的系统结构模型,对堤身系统进行安全特性综合评判,在此基础上,构建了广义多维加权模糊识别模型,完成了对具体堤防工程堤身段安全模式的模糊识别。

(3)开发了仿真计算程序 AEGIS. for、MUSE2. for、SIMPL. for,可实现堤防工程风险决策与安全综合评判的智能化研究与分析。

(4)在传统的可靠度理论基础上,分析了岩土工程构筑物可靠度问题所涉及的模糊性及随机性,并引入考虑变量非正态分布及互相关性的当量 FORM 算法,重新定义了岩土工程边坡体的模糊随机失效概率,实现了对传统可靠度理论的软化处理,同时结合蒙特卡罗模糊随机模拟,对边坡体的模糊随机可靠度及相关参数的广义敏感特性进行系统深入地探讨和研究。

(5)分析了岩土工程构筑物失效所具有的系统特性,并考虑了边坡体滑动失稳与渗透破坏两种失效模式,首先在传统的系统失效理论上研究了边坡体系统的可靠性,进而考虑边坡体承载安全状态的模糊性,在其服从降半  $\Gamma$  分布的前提下给出了对应的边坡体系统失效概率。

(6)编制了模糊随机可靠度算法,并研制开发了相应的数值计算程序

FMCSLP. for、FMCSP. for, 可实现多工况下岩土工程边坡体模糊随机可靠度的仿真研究与分析。

(7) 对岩土类多孔介质渗流场进行了基于有限差分法的蒙特卡罗随机模拟, 分析了渗流场参数及边界条件的随机性对场内水头势分布的影响, 所得到的随机渗流场分布相比传统的确定性渗流场分布具有一定的学科进步性; 针对岩土工程构筑物中普遍存在的防渗反滤设施, 提出了模糊随机设计思想, 并建立了对应的模糊可靠度模型。

(8) 基于随机差分数值方法开发完成了计算程序 CRNDIF. for 及 MCSDF. for, 可完成随机渗流场的仿真模拟任务。

本书是在国家自然科学基金(51109118)、浙江省自然科学基金(LY14E090001)联合资助下完成的, 从事相关研究工作期间, 得到了清华大学水沙科学与水利水电工程国家重点实验室的张楚汉院士及金峰教授课题组、长江水利委员会长江科学院水利部岩土力学与工程重点实验室饶锡保教授级高工、龚壁卫教授级高工、张家发教授级高工、张伟教授级高工等专家的指导与帮助, 浙江大学知名学者澳籍专家张我华教授、温州大学岩土工程专家王军教授为本书作了全文审核, 在此一并表示诚挚的谢意。

由于作者水平有限, 书中难免存在不足之处, 敬请读者批评指正。

王亚军

2014 年于浙江海洋学院

# 目 录

## 前言

|                                      |    |
|--------------------------------------|----|
| 第 1 章 绪论 .....                       | 1  |
| 1.1 问题的提出 .....                      | 1  |
| 1.1.1 岩土类介质的工程特性 .....               | 1  |
| 1.1.2 岩土类介质的工程环境 .....               | 1  |
| 1.1.3 岩土工程非确定性问题的提出及研究思路 .....       | 2  |
| 1.2 堤防系统安全评价方法及安全模式识别概述 .....        | 3  |
| 1.3 当前国内外关于堤防大系统安全综合评价的研究现状 .....    | 4  |
| 1.4 模糊一致理论在岩土类介质构筑物大系统综合评价中的应用 ..... | 5  |
| 1.5 可靠度理论概述 .....                    | 5  |
| 1.6 模糊数学理论在结构可靠度分析中的应用 .....         | 7  |
| 1.7 当前岩土类介质构筑物可靠度研究领域的一些进展 .....     | 7  |
| 1.8 岩土类介质非确定性数值分析方法概述 .....          | 8  |
| 1.9 本书主要内容 .....                     | 8  |
| 参考文献 .....                           | 9  |
| 第 2 章 堤防工程风险评价体系的研究和应用 .....         | 15 |
| 2.1 堤防工程风险评价系统指标体系的构建 .....          | 15 |
| 2.2 风险性决策技术研究 .....                  | 17 |
| 2.2.1 模糊一致理论的提出 .....                | 17 |
| 2.2.2 模糊一致理论与层次分析法的嵌套 .....          | 22 |
| 2.2.3 荆南长江干堤典型护岸段的系统风险评价 .....       | 35 |
| 2.3 堤防工程安全模式综合评判及模式识别 .....          | 43 |
| 2.3.1 AHP 模糊综合评判系统结构模型的构建 .....      | 44 |
| 2.3.2 堤身断面安全模式综合评判 .....             | 46 |
| 2.3.3 典型堤身断面安全模式识别 .....             | 52 |
| 2.4 本章小结 .....                       | 61 |
| 参考文献 .....                           | 62 |

|                                     |     |
|-------------------------------------|-----|
| <b>第3章 岩土工程边坡体的模糊随机可靠度分析</b>        | 66  |
| 3.1 边坡稳定分析方法的研究现状及发展趋势              | 67  |
| 3.1.1 基于随机理论的可靠性分析方法                | 67  |
| 3.1.2 模糊综合评判法                       | 68  |
| 3.1.3 模糊随机可靠度理论                     | 68  |
| 3.2 岩土边坡可靠性分析的基本原理                  | 68  |
| 3.2.1 非确定性的来源                       | 69  |
| 3.2.2 可靠度分析的基本方法                    | 69  |
| 3.3 可靠度计算方法                         | 75  |
| 3.3.1 蒙特卡罗模拟算法                      | 75  |
| 3.3.2 一次二阶矩算法                       | 78  |
| 3.3.3 岩土体构筑物边坡系统可靠度分析方法             | 89  |
| 3.4 构筑物的模糊随机可靠度分析                   | 90  |
| 3.4.1 模糊概率的定义                       | 91  |
| 3.4.2 构筑物可靠度分析中模糊性的来源               | 92  |
| 3.4.3 模糊随机可靠度的提出                    | 93  |
| 3.4.4 模糊随机可靠度的算法                    | 95  |
| 3.5 边坡稳定的模糊随机可靠度分析及参数的敏感性分析         | 99  |
| 3.5.1 滑动失效模式的模糊随机算法的建立              | 100 |
| 3.5.2 边坡体渗透破坏失效模式的模糊随机算法的建立         | 105 |
| 3.5.3 荆南长江干堤堤身边坡体滑动破坏失效模式下随机参数敏感性分析 | 106 |
| 3.5.4 边坡体渗透破坏失效模式下随机参数敏感性分析         | 114 |
| 3.5.5 堤身边坡滑动与渗透破坏联合的模糊随机可靠度         | 114 |
| 3.6 本章小结                            | 116 |
| 参考文献                                | 117 |
| <b>第4章 岩土工程渗流科学的非确定模拟方法</b>         | 121 |
| 4.1 渗流数值模型的分类                       | 122 |
| 4.2 基于差分数值方法的二维定常承压流确定性渗流模型的建立      | 123 |
| 4.2.1 基本控制方程及边界条件                   | 123 |
| 4.2.2 数值模型的适定性                      | 123 |
| 4.2.3 二维定常承压流的广义差分方程表达及差分格式         | 123 |
| 4.2.4 边界条件的处理                       | 125 |
| 4.3 基于差分数值方法的二维定常承压流随机渗流模型的建立       | 126 |

---

|                                      |     |
|--------------------------------------|-----|
| 4.4 二维定常承压流确定与随机模型的几个应用实例 .....      | 128 |
| 4.5 防渗反滤设施的模糊可靠度 .....               | 131 |
| 4.5.1 防渗反滤设施设计当中的随机性及随机模型 .....      | 131 |
| 4.5.2 防渗反滤设施设计当中的模糊随机性及模糊可靠度模型 ..... | 133 |
| 4.6 本章小结 .....                       | 137 |
| 参考文献 .....                           | 138 |
| 第5章 研究结论 .....                       | 140 |
| 附录 A 数值计算程序源代码 .....                 | 142 |
| 附录 B 附图 .....                        | 230 |

# 第1章 绪 论

## 1.1 问题的提出

### 1.1.1 岩土类介质的工程特性

与其他类型的介质相比,岩土类介质具有很大的非确定性。这主要是由于岩土类材料多为天然沉积形成<sup>[1]</sup>,成岩年代久远,难以详细了解和掌握形成机理、特性参数分布及空间上的结构状态。这一类材料与其他类型材料(如各种人工合成材料)相比具有较大的变异性<sup>[2]</sup>,其工程特性具有明显的非确定性——随机性。

此外,在对岩土类介质进行模拟与仿真分析过程中,需要对各种性态复杂的岩土类材料建立相应的本构,甚至是广义本构计算模型,而这些模型本身对于参数的定义也具有很大的非确定性<sup>[3]</sup>,天然材料的固有离散性导致各类工程量值的主观外延具有不同程度的非确定扰动特征<sup>[4~13]</sup>。这种非确定性有别于前述的随机性,主要表现为对于参数外延的不明确性<sup>[14]</sup>——模糊性。

岩土类介质多为三相系介质,表现为多孔的固相介质与空隙中的气、液相介质,本书主要涉及固、液两相介质。

### 1.1.2 岩土类介质的工程环境

本书所涉及的研究对象是在自然环境下运行的构筑物,其工程运行环境同样具有某些非确定性。针对不同的非确定性也有不同的分析手段,可扼要地归结为如下几个方面<sup>[15~19]</sup>:

(1)随机性。造成这类非确定性的主要原因包括试验分析带来的非确定性以及统计分析带来的非确定性。表现为事件发生条件不充分,条件与结果之间没有必然的因果关系,事件的生成与否表现出不确定性。处理此类非确定性要借助于概率、统计、随机过程等手段。

(2)模糊性。造成这类非确定性的主要原因包括对象完整信息的不可预知性、确定外延所需的内涵具有互悖性。表现为研究对象外延不明确,即一个对象是否符合既定概念是难以确定的,一个集合或者一个域到底包含哪些对象也无法确

定,表现为客观对象差异中间过度中的不分明性。考虑此类非确定性要借助于模糊数学中的概念。

(3)非确知性<sup>[20]</sup>。此类非确定性主要是由知识的不完善性造成的,目前还没有很成熟的数学方法。工程中常借助于专家经验对这种非确定性进行评估、引入经验系数等手段。目前的做法是将此对象用颜色描述为三类问题:白色系统、黑色系统和灰色系统。

本书中主要涉及前两种非确定性。

### 1.1.3 岩土工程非确定性问题的提出及研究思路

从上述内容可以看出,在岩土工程领域,诸多非确定性是客观存在的,而且对分析结果有较大的影响。然而,长期以来由于受客观条件和认识水平所限,这一领域一直是由各种确定性理论所支配。以致在触及某些层次性和动态性较为明显、涉及因素复杂的问题时,无法合理地统筹各类因素,使得结论越加含混不准确<sup>[21]</sup>。

在处理岩土类介质构筑物的可靠度问题时,确定性理论的弊端尤为明显,最早被用来进行结构安全分析的是所谓的允许应力法——按照规范取得相应的安全系数,若最大应力与允许应力的比值不大于规范给出的安全系数即认为是安全的。可以看出,在这类确定性分析方法中,大量的信息被简单的、经验性规范所忽略,有失客观。例如,在边坡稳定方面,通过一些岸坡稳定的研究实例发现,尽管计算的安全系数大于1,但斜坡仍然受到破坏。要将这些自然界的的信息较为全面地反映出来就必须借助于某些数学手段<sup>[22~24]</sup>。岩土工程构筑物及结构物的许多物理力学量值外延定义并不明确,特征之本质不同于概率分布,其刻画物理力学场量的发育、演化程度的模糊性。由于这一特征和传统的工程力学概念区别较大,在工程中不甚普及,但又客观上影响、控制着岩土工程构筑物及结构物的安全状态<sup>[25~28]</sup>。在堤防渗流分析方面,渗流场受到许多随机因素的制约和影响,如模型中各种参数的不确定性、模型定解条件(初始条件和边界条件)中包含的不确定性等,这些非确定性导致模型的解(水头)是有一定概率分布的随机函数,而传统的分析手段忽略了这些客观工程结构的物理特性<sup>[29~31]</sup>。堤防等填筑工程在施工过程中的随机性及随机演变使构筑物的工作性态具有显著的非确定性,故此采用可靠指标、失效概率进行研究比之传统的应力应变分析更为直接,且易于给出简单明了的工程结果<sup>[32~35]</sup>。首先用来作为可靠度分析的理论以概率、统计理论为基础,这类方法将结构失效定义为某些随机变量的函数,而结构失效就是一个随机事件<sup>[36,37]</sup>。将结构的可靠度问题看成一个随机事件是比较大的进步,但还应当注意到,可靠度问题

不仅具有前述的随机性,在很大程度上还具有模糊性<sup>[38~40]</sup>。在这种岩土类两相介质构筑物可靠性问题中,模糊性是一种更为深刻、更为普遍的不确定性<sup>[41]</sup>。近年来,建筑工程质量几度下滑,工程事故屡有发生,建筑物坍塌、失效的情况呈上升趋势,甚至造成了众多的人身伤亡。业内人士对此高度关注,并反思我国建筑结构设计规范的可靠度水平是否偏低<sup>[42~46]</sup>。

目前,我国缺乏堤防工程在复杂环境下运行的风险分析、安全评价理论体系以及实用模型<sup>[47]</sup>。这种现状极大地阻碍了对汛期堤防系统的行为进行分析并做出相应的安全性评价,使我国的防汛抢险处于一种紧急被动、消极反应的局面。作为本书内容的一部分,如果不考虑堤防安全评价及模式识别的非确定性、不借助于相应的非确定性理论,要得出有价值的结论是比较困难的。

针对上述问题,首先,本书试图通过模糊数学的方法将堤防这一复杂大系统的模型较为客观又不失灵活性地建立起来,以便取得一些具有指导意义的结论;其次,为了将岩土类介质问题中客观存在的模糊、随机这两种非确定性更好地结合,并妥善地应用于实际工程的可靠度问题中,本书拟就某一具体问题运用模糊随机理论对其进行非确定性分析,并给出相应的模糊随机可靠度计算方法;再次,为了更好地反映两相介质渗流场客观存在的各种非确定性,本书将基于差分数值方法对只考虑随机性的渗流场做初步的分析研究。

## 1.2 堤防系统安全评价方法及安全模式识别概述

系统工程设计<sup>[48]</sup>将系统(system)、元件(component)、过程(process)服务于需求目标,应用基础科学、数学、工程科学实现资源向需求目标之间的转换,是一种决策过程(通常要反复进行)。

从系统的设计过程来看,应当包括以下几点:目标及准则的确立、综合、分析、实施及评价。其中的核心部分是决策及分析。

根据 Nadle 的系统方法论,一个完整的设计过程应当包含以下几点:

- (1)设计是分层次的。这是理解设计系统的复杂程序、子系统及其联系的关键。
- (2)设计是功能性的。设计成果必须服务于有效的功能。
- (3)设计意味着决策。需经过详细评价后从多个方案中选择一个有效的方案。
- (4)设计需反复进行。要对已有的设计结论(甚或目的、功能等)进行协调、变化、改进。

(5)设计追求最优化价值。设计的目的是寻求系统的局部最优,而不是系统中各单元因子的局部行为。

具体到堤防系统的问题,重点在于对堤防工程大系统的安全性作出评价。由于影响因素复杂,相互间又有着千丝万缕的联系,要真正实现此系统的功能,作出稳妥的决策、评价,设计方法的合理选用显得尤为重要,必须兼顾堤防系统安全概念的层次性、动态性,将安全评价定量化、模型化<sup>[49]</sup>。

目前,国内外用来处理这类大系统建模最常见也最有力的工具是层次分析法(analytic hierarchy process, AHP)<sup>[50]</sup>。堤防为岩土类两相介质构筑物,在运用 AHP 理论建立系统模型时所涉及的各项系统指标中,定性、定量<sup>[51~55]</sup>相互混杂,对安全的定义也包含有较大的非确定性。此外,要将这些不同层次、不同地位的系统指标联系起来形成一个有机的评价体系,借助于其他的确定性手段要面临很大的困难,在这里引入一个目前系统工程界较为年轻、颇具生命力的理论工具——模糊一致理论(fuzzy consistency theorem)<sup>[56]</sup>,这一理论工具对于处理模糊性较强、定性指标较多、层次性明显的评价体系十分有效。

系统设计要具有功能性、目的性,上述这种安全综合评价体系最终将以综合优度值的形式给出评价最优方案,这是建立在整个大系统之上的局部最优值。

在实际工程中,往往存在这样的情况,已经有了一个可以用来作为对照的理想优模型——根据既往历史得出的符合某一评价标准为最优的方案,需要对现有的一些待评价方案进行比照并从中选出一个相对最优方案。在比照过程中需要考虑的因素仍然具有前述大系统的特征。这类问题对堤防系统安全评价而言更具有现实意义,因为,其工程运行状况具有不可再现性,这样一来,历史运行状况便显得极端珍贵,也最具说服力,以其作为比照对象得出的评价结论也将具有很高的置信度。这种分析手段称为模式识别。

在模式识别过程当中,要借助于距离、贴适度<sup>[57]</sup>等数学工具的构造,本书将采用多维贴适度<sup>[18]</sup>来做识别。

### 1.3 当前国内外关于堤防大系统安全综合评价的研究现状

目前国际上已逐渐意识到水利工程项目各组成部分之间有着紧密的关系,水利枢纽整体安全性能与各构成建筑物的运行状况息息相关<sup>[58]</sup>。要对这样一个巨大的系统工程作出一个真正意义上的综合安全性能评价,其难度是可想而知的。长期生活在碧海汪洋环抱之中的荷兰较早地提出了挡水建筑物(dike)的安全运行

除了与自身工况有关外还和处于同一体系(ring)中其他建筑有关,但在文献[59]中,更多的内容还是集中在就系统的某一部分在考虑某一项或某几项影响因素的条件下,建立计算、评价模型;近几年国内也在这一领域开展了一些颇有意义的研究工作,童海鸿等<sup>[60]</sup>运用模糊综合评判的方法对三峡库区堤防护岸工程选址做了研究;汪华斌等<sup>[61]</sup>对清江鱼洞河滑坡体系作了一些有意义的分析研究;刘沐宇等<sup>[62]</sup>以原范例为基础对边坡稳定识别作了一些具有创新意义的工作。

## 1.4 模糊一致理论在岩土类介质构筑物大系统综合评价中的应用

由于岩土类介质构筑物大系统涉及诸多定性指标(它们同时还具有很大的模糊性<sup>[51]</sup>,这些指标在依附于同一大系统的同时,在各个子系统内又相互独立),在实现指标体系的综合时,在同一子系统内这种综合可以很容易地实现,但综合以后的判断矩阵<sup>[63]</sup>往往不再符合一致性,即 AHP 中的矩阵所应满足的四个条件:①  $a_{ii} = 1$ ; ②  $a_{ij} = a_{ik}/a_{jk}$ ; ③  $a_{ij} = 1/a_{ji}$ ; ④  $a_{ij} = \omega_i/\omega_j$ <sup>[64]</sup>。在这里采用模糊一致理论中的三标度法首先给出模糊优先关系矩阵  $B$ ,再将其改造为模糊一致矩阵,此时其满足一致性条件<sup>[41]</sup>

$$r_{ij} = r_{il} - r_{jl} + 0.5$$

由文献[57]可知,通过蒙特卡罗五万次模拟,在 75% 和 95% 的保证条件下,从实用的角度来讲,改造后的判断矩阵已经基本上满足严格意义下模糊一致矩阵所应满足的四个条件,从而可以作为一致矩阵在工程中应用。

## 1.5 可靠度理论概述

结构在规定的时间内与条件下完成预定功能的概率称为结构的可靠度。这里规定的时间指的是结构的设计基准期,如中小型挡水建筑物一般规定使用期为 100 ~ 150 年;规定条件指的是设计预先确定的结构所可能要经受的各种施工和使用条件;预定功能一般指结构在使用过程中应具有的四项基本功能<sup>[65]</sup>:

(1) 能承受正常施工和正常使用时可能出现的各种作用(包括荷载、外加变形、约束变形)。

(2) 在正常使用时具有良好的工作性能。

(3) 在正常维护下具有足够的耐久性能。

(4)在偶然事件(如爆炸、车辆撞击、超过设计烈度的地震、龙卷风等)发生时及发生后,仍能保持必需的整体稳定性(即结构仅产生局部的损坏而不至于发生连续倒塌)。

完成各项功能的标志则由极限状态来衡量。结构整体或部分在超过某状态时,结构就不能满足设计规定的某一功能的要求,这种状态称为结构的极限状态<sup>[66]</sup>。极限状态是区分结构工作状态为可靠或不可靠的标志。在结构设计当中,传统的设计原则用抗力的均值 $\bar{R}$ 同荷载效应的均值 $\bar{S}$ 进行比较,当 $\bar{R}$ 大于 $\bar{S}$ 时,说明结构可靠。在考虑到了结构可靠度存在有随机性时,即抗力、荷载效应、结构尺寸等都是些随机变量,所以,存在着抗力 $R$ 小于荷载效应 $S$ 的可能性。这种可能性的大小就用所谓的失效概率 $P_f$ 来表示。设结构的随机设计变量为 $X$ ,功能函数表示为 $G(X) = R(X) - S(X)$ 。当 $G(X) > 0$ 时,表示结构可靠,其对应的概率称为可靠概率,用 $P_r$ 表示;当 $G(X) < 0$ 时,表示结构失效,其概率称为失效概率 $P_f$ 。失效概率与可靠概率满足互补条件,即 $P_r + P_f = 1$ 。工程上常用可靠指标 $\beta$ 来表示结构的可靠程度。当功能函数服从正态分布时,可靠指标 $\beta$ 与可靠概率 $P_r$ 有对应关系,可通过正态分布函数变换得到。通常结构的可靠指标及失效概率计算方法可以分为三大类<sup>[67]</sup>:

- (1) FORM(first order reliability method)算法。
- (2) SORM(second order reliability method)算法。
- (3) MCS(monte carlo simulation)算法。

此外,目前,一种借鉴生物界自然选择和自然遗传机制的随机化搜索算法——遗传算法的研究和应用已经成为国内外学术界的热点之一<sup>[68~70]</sup>。

目前在工程界,结构可靠度分析主要是以随机可靠性理论为基础的,但是,这类可靠性理论具有三个明显的局限性<sup>[71]</sup>:

- (1)只考虑了一种非确定性,即随机性。
- (2)研究的只是设计方案的可靠性,而不包括真实结构的可靠性。
- (3)在该理论中,结构所处状态安全的界限是明确的,即非此即彼,没有中间状态,而实际上这种界限必然是模糊的,亦即结构安全这一事件本身不可能有一刀切般确定性的定义和评价标准。

因此,结构可靠度理论研究由只考虑结构设计参数的随机性拓展到既考虑设计参数的随机性和模糊性<sup>[72]</sup>,又考虑结构安全状态的模糊性的模糊随机可靠度理论研究<sup>[73~75]</sup>。

## 1.6 模糊数学理论在结构可靠度分析中的应用

应用模糊数学处理结构可靠性问题起源于1975年Kaufmann的工作<sup>[76]</sup>。当时引入可能性概念来表示元件的可靠度,但他的工作只是一个抽象的想法,缺乏实践基础。Kaufmann既未能对可能性概念加以系统阐述,也未能给出明确的物理意义。1979年,Blockley采用模糊集理论将结构的破损划分为不同程度的各个阶段,从而评价结构的可靠性<sup>[77]</sup>。Brown提出了结构安全测度的概念<sup>[78]</sup>,用模糊集理论来表示结构的可靠度,进而又提出用信息熵来表示可靠度,使得广义可靠度的分析方法得到了发展。Yao则把Brown的思想应用到既有结构的评价上<sup>[79]</sup>。Ayyub对于模糊数学在结构可靠性的应用进行了比较全面的评价<sup>[80]</sup>。Singer对传统的结构可靠度函数进行了模糊化描述<sup>[81]</sup>,我国学者王光远院士从抗震结构所受荷载(地震荷载)的模糊性和随机性出发,建立了抗震结构的模糊可靠性分析方法<sup>[82]</sup>。

目前,在结构模糊可靠度理论研究中存在两条途径,一是以模糊集合描述随机现象,利用Zadeh给出的模糊事件的概率定义结构的模糊可靠度;二是以模糊随机变量为基本变量描述模糊随机现象,应用水平截集法以模糊概率(模糊数)定义结构的模糊可靠度。本书方法属于前者。

## 1.7 当前岩土类介质构筑物可靠度研究领域的一些进展

具体到岩土类水、土两相介质构筑物这类特殊的结构体系,其可靠度研究显得更为复杂,主要的原因前面已经多次提到,这里不再赘述。为了可以较为全面而且较为合理的反映出这类结构物的可靠度,必须就水、土这两相所具有各种非确定性都有所了解、考虑,去粗取精、合理取舍,以期最大限度地结构的可靠性全面地反映出来。要做到这一点当然是有一定的难度的。程旭日<sup>[83]</sup>运用改进的希尼脱法,对考虑非稳定渗流的边坡稳定性作了分析研究,比较精确地定出了浸润线的下降位置以及最危险的可能滑动面的安全系数和稳定性可靠度指标;汪明武等<sup>[84]</sup>运用蒙特卡罗法对砂性土的液化作了分析,就动荷载作用下土体液化概率得出了一些有价值的结论;王成华<sup>[85]</sup>研究了龙羊峡水库滑坡体系,并就库水位变化对岸坡变形的影响作了分析;袁迎如<sup>[86]</sup>还对水下滑坡体的演变特性作了较为深入的探讨。

## 1.8 岩土类介质非确定性数值分析方法概述

关于岩土类介质的数值方法主要包括应力场、渗流场以及温度场等方面的数值模拟,其中关于渗流场数值模拟的理论及方法发展较为迅速<sup>[87~89]</sup>,尤其是有限单元法及有限差分法在渗流场模拟当中的应用,可以说,目前国内外在这方面的研究已经达到了一个较高的水平<sup>[90,91]</sup>。渗流场模拟常常要考虑到固相介质均值、非均值,各向异性、各向同性等因素,屈少华<sup>[92]</sup>运用蒙特卡罗的方法就三维各向异性渗流模型的连接性做了研究,在理论上指出了这类问题为特殊的普适类;长江科学院<sup>[93]</sup>基于有限单元法研制的三维非均值各向异性稳定渗流计算程序在这方面解决了一些问题;大连理工大学的张洪武<sup>[94,95]</sup>就非饱和两相介质的有限元耦合数值模型的算法进行研究,在变分理论的基础上给出了非饱和多孔介质耦合问题的变分泛函以及具体的算法过程;海河大学的王媛<sup>[96]</sup>以 Biot 理论为基础,采用伽辽金有限单元法,就多孔介质渗流场、应力场两场耦合的计算方法给出了以节点位移及孔隙水压力为未知量的基本方程组,获得了三维渗场与应力场的耦合计算方法。

在岩土类介质非确定性数值方法方面,国内起步较晚<sup>[97~99]</sup>,国外大约开始于 20 世纪 60 年代。由于地质构造的复杂性,渗流场呈现明显的随机性,表现出来的是介质的渗透系数具有不确定性<sup>[100]</sup>。开始,人们简单地把这一参数当做随机变量通过统计分析求得。20 世纪 70 年代起,渗透系数的空间变异性得到重视,开始有人运用 Kriging 法进行点估计<sup>[101]</sup>,Jones 运用蒙特卡罗法对分区渗透系数进行模拟,得到了较为满意的结果<sup>[102]</sup>;目前国内在这方面的研究也取得了较大的成就<sup>[29,30]</sup>,张汝清等给出了随机变量的变分原理的一般表达式<sup>[103]</sup>,秦权给出了随机场离散的几种方法是随机有限单元法的理论基础<sup>[104]</sup>。

具体到随机渗流场的求解方法目前常用的有蒙特卡罗模拟、解析法、偏移量等效法、谱分析法、随机有限元法。

## 1.9 本书主要内容

本书以岩土类介质构筑物的非确定性分析为主线,考虑到目前在诸如岩土工程复杂大系统安全评价、结构多非确定性因素可靠度分析及岩土类多孔介质随机数值方法等方面的研究工作还有很大的开拓空间,结合几个具体的工程实例完成了一些工作,主要包括以下三大部分:

(1)根据岩土工程的特性引进了风险性决策和安全模式识别技术,针对堤防工程的具体特点进行了推广及应用研究,编制了相关的计算程序 MUSE2. for 以及 SIMPL. for,并结合荆南长江干堤进行具体的演算。

(2)借助于 MCS 模拟以及 FORM 算法,将构筑物的安全状态作为一个模糊论域,尝试将模糊理论与可靠度分析相结合,使得可靠度分析由原来的点失效模式转化为区间失效模式。引入相应的隶属度函数以此来反映堤防边坡体的失效程度。

(3)分析了岩土工程多孔介质渗流场中的随机特性,指出了建立非确定性数值模型的意义,在此基础上,构建了基于差分理论的随机数值模型,并且就若干具体算例作了分析研究,与确定性数值模型作了对比,进一步验证了非确定性数值模型在理论上优越性。

### 参 考 文 献

- [1]高大钊. 地基基础工程标准化与概率极限状态设计原则. 岩土工程学报,1993,15(4): 8~14.
- [2]岩土工程可靠度可行性研究攻关组. 关于地基可靠度分析方法的建议,岩土工程可靠度可行性研究成果汇编. 武汉:长江科学院长江出版社,1992.
- [3]黄志权,王思敬,李华晔,等. 岩体力学参数取值的置信度及其可靠性. 岩石力学与工程学报,1999,18(1):33~35.
- [4]王亚军,张我华,金伟良. 一次逼近随机有限元对堤坝模糊失效概率的分析. 浙江大学学报(工学版),2007,41(1):52~56.
- [5] Wang Y J, Zhang W H, Jin W L, et al. Fuzzy stochastic generalized reliability studies on embankment systems based on first-order approximation theorem. Water Science and Engineering, 2008,1(4): 36~46.
- [6]王亚军,张我华. 龙滩碾压混凝土坝随机损伤力学分析的模糊自适应有限元研究. 岩石力学与工程学报,2008,27(6):1251~1259.
- [7]王亚军,张我华. 基于模糊随机损伤力学的模糊自适应有限元分析. 解放军理工大学学报(自然科学版),2009,10(5):440~446.
- [8]王亚军,张我华. 荆南长江干堤模糊自适应随机损伤机理研究. 浙江大学学报(工学版),2009,43(4):743~749,776.
- [9]王亚军,张我华. 岩石边坡模糊随机损伤可靠性研究. 沈阳建筑大学学报(自然科学版),2009,25(3):421~425.
- [10]王亚军,张我华. 非线性模糊随机损伤研究. 水利学报,2010,41(2):189~197.
- [11]王亚军,张我华. 堤防工程的模糊随机损伤敏感性. 浙江大学学报(工学版),2011,45(9): 1672~1679.