

大连理工大学学术研究丛书

工程结构可靠度 计算方法

Computational Methods for
Reliability of Engineering
Structures

贡金鑫◎著



大连理工大学出版社
Dalian University of Technology Press

大连理工大学学术研究丛书

工程结构可靠度计算方法

贡金鑫 著

大连理工大学出版社

© 贡金鑫 2003

图书在版编目(CIP)数据

工程结构可靠度计算方法/贡金鑫著. —大连:大连理工大学出版社, 2003.9

大连理工大学学术研究丛书

ISBN 7-5611-2420-1

I. 工… II. 贡… III. 工程结构—结构可靠性—结构计算—计算方法 IV. TU311.2

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2003)第 093350 号

大连理工大学出版社出版

地址:大连市凌水河 邮政编码:116024

电话:0411-4708842 传真:0411-4701466 邮购:0411-4707961

E-mail: dulp@mail.dlptt.ln.cn URL: http://www.dulp.cn

大连海事大学印刷厂印刷

大连理工大学出版社发行

幅面尺寸:140mm×203mm 字数:368千字 印张:14.75 插页:4
印数:1~3000

2003年9月第1版

2003年9月第1次印刷

责任编辑:张凤

责任校对:梁艾玲

封面设计:孙宝福

定 价:38.00元

前 言

不确定性是工程结构设计、施工和使用中存在的客观现象,对这种客观现象的认识由来已久,但真正用理论的方法加以研究,并把研究成果用于结构设计规范才是近几十年的事。传统的经验安全系数设计法已使用了多年,对其中所蕴含的安全度不能给予科学的解释,对安全系数大小的取值,则是根据工程事故率的高低来不断调整的,这不免要以过大的材料浪费和潜在的巨大经济、生命损失为代价。用理性的方法逐步取代经验性的方法,或逐步减少经验性的成分,是科学技术发展的必然结果,也是事物发展的基本规律。工程结构可靠性理论正是在这一背景下发展起来的用于处理和分析工程结构中随机性的方法。近年的工程实践表明,尽管目前这一理论还不是很完善,但由于其合理地考虑了工程结构中存在的随机性,对结构可靠性具有统一的度量指标,已被广大工程技术人员接受,成为工程结构设计理论发展的一个重要方向。它的发展对保证工程结构的安全性、适用性和耐久性具有重要的意义。

作者自20世纪90年代初开始工程结构可靠性的研究,随后作为主要参加人参加了交通部为编制《公路工程结构可靠度设计统一标准》而设立的三个科研项目“公路桥梁结构可靠度研究”、“公路桥梁结构设计分项系数的研究”和“公路桥梁结构荷载组合和组合系数的研究”。三个项目于

1996年通过了陕西省科委组织的鉴定,认为达到了“国际先进水平”,研究成果被统一标准采用,并于1997年获陕西省科技进步二等奖(名序2)。1996年作者投于我国结构工程专家赵国藩院士门下深造,继续开展工程结构可靠性理论与应用的研究,期间作为主要参加人先后参加了赵国藩院士负责的国家攀登计划项目“重大土木及水利工程安全性与耐久性的基础研究”的第6.1课题“有关建筑结构安全性与耐久性设置标准的基础研究”,国家自然科学基金项目“工程结构生命全过程可靠度研究”(59878008)和教育部博士学科点专项科研项目“高层、高耸结构抗风可靠度研究”,其间获辽宁省教委科技进步一等奖1项(名序2)、国家科技进步二等奖1项(名序7)。1999~2001年从事博士后研究期间,作者作为主持人先后获得中国博士后基金项目“腐蚀条件下钢筋混凝土结构疲劳和抗震可靠度的分析方法”(001077)、辽宁省科学技术基金项目“海洋环境下钢筋混凝土结构的抗力衰减模型和可靠度评估”和国家自然科学基金项目“受腐蚀钢筋混凝土结构动力性能和可靠度的研究”(50078009)的资助。目前正参加我国《港口工程结构可靠度设计统一标准》的修订工作。结合这些研究项目,作者阅读了国内外大量有关结构可靠度基本理论、计算方法和规范应用研究的文献,并发表了多篇可靠度的研究论文,在对工程结构可靠度理论与应用不断了解的同时,研究水平也得到了提高。

目前国内外已出版了多本有关工程结构可靠度的著作,但专门介绍可靠度计算方法的不多。事实上,除了目前常用的结构可靠度计算方法外,还有许多很好的计算方法未得到介绍和使用,这些方法可用于提高计算的精度、特殊情况的可靠度分析或用于可靠度的数值模拟。基于这一考

虑作者完成了本书,除了介绍国内外其他研究者一些好的计算方法外,还介绍了作者本人在结构可靠度研究方面做的部分工作,以与读者共同切磋。本书共分10章,主要内容包括结构可靠度计算方法的发展过程和可靠度的基本理论,单个失效模式结构各种不同的可靠度计算方法和多个失效模式结构可靠度的计算方法,模糊失效准则结构的可靠度计算方法和可靠度的蒙特卡罗方法。需要说明的是,结构可靠度计算的是规定条件和假定下结构或构件的失效概率,计算结果与统计参数的准确性、分析中的假定及失效准则有关,是一个相对结果,可用于在相同统计参数、相同条件下不同结构或构件可靠度的比较,以便于工程决策,所以本书所介绍的各种分析方法,其精度的对比也是相对的。另外,结构可靠度计算的只是供工程决策的一个指标,而结构的可靠性并不能完全靠可靠度计算来保证,还需要通过合理的构造措施和概念设计来满足,同时还要充分利用以往积累的大量工程经验。因此,不能将计算的结果与结构真实的安全性等同起来。

作者首先要感谢导师赵国藩教授,在作者对工程结构可靠度课题感兴趣时,是他为作者提供了深造的机会。他的指点加深了作者对工程结构可靠度的理解,开阔了作者研究的思路,从而在研究中把握正确的方向,研究水平得以提高。著述本书是作者总结10余年研究、学习的心得,同时也是对他几年来精心培育的回报。感谢大连理工大学校长程耿东院士和工程力学系的李刚博士,作者曾多次参加他们研究组关于工程结构可靠度的学术讨论,不仅开拓了视野,也从中受益匪浅。感谢土木水利学院海动研究室康海贵教授,本书稿的部分内容曾在他的研究组中做过学术讲座,他们对讲座内容做了积极的讨论,对书稿提出了中肯的意见,

在写作方法上使作者受到启发。感谢上海交通大学刘西拉教授,在交大工作一年多的时间里,他务实求新的学术风格,与作者多次的学术讨论,启发了作者的思维。感谢土木水利学院结构工程研究所的宋玉普教授、黄承逵教授、王清湘教授、徐世烺教授、吴智敏教授和丁一宁教授及殷福新、王苏岩、贾金青等老师,尽管研究方向不同,但良好的工作环境和学术气氛使作者的学术思想受到熏陶,本书的完成与他们的关心和鼓励是分不开的。另外,还要感谢土木水利学院的各位领导,他们的支持是作者完成本书的坚强后盾。

由于作者水平有限,加之时间仓促,书中倘有谬误之处,诚望读者不吝赐教。

贡金鑫

2003年2月

目 录

前 言

第1章 绪 论	1
1.1 结构可靠度理论与计算方法的发展	3
1.1.1 一次二阶矩方法	3
1.1.2 二次二阶矩方法及积分方法	6
1.1.3 其他方法	7
1.1.4 结构体系可靠度	8
1.1.5 结构可靠度的蒙特卡罗模拟方法.....	12
1.2 本书的主要内容.....	14
第2章 结构可靠度的概念和原理	26
2.1 结构分析中的不确定性.....	26
2.2 结构设计中的随机变量与随机过程.....	29
2.2.1 随机变量.....	29
2.2.2 随机向量.....	35
2.2.3 随机过程.....	37
2.3 作用与作用效应.....	41
2.3.1 作用.....	42
2.3.2 作用效应.....	47
2.3.3 作用效应组合.....	48
2.4 结构抗力.....	52
2.4.1 影响抗力的三种不确定性.....	52
2.4.2 抗力的概率分布类型.....	53

2.5	结构极限状态	54
2.6	结构可靠度与可靠指标	58
2.6.1	结构可靠度	58
2.6.2	结构可靠指标	63
第3章	结构可靠度分析的一次二阶矩方法	68
3.1	中心点法	68
3.2	验算点法	75
3.2.1	随机变量服从正态分布的情形	76
3.2.2	随机变量不服从正态分布的情形	96
第4章	结构可靠指标的一般计算方法	122
4.1	有限步长迭代法	123
4.1.1	基本迭代公式	123
4.1.2	迭代的收敛性	126
4.1.3	当量正态化方法	133
4.2	一般计算方法	138
4.2.1	基本迭代公式	138
4.2.2	迭代的收敛性	141
第5章	相关随机变量结构的可靠度分析方法	154
5.1	正态相关随机变量结构的可靠度分析方法	154
5.2	变量相关情况下可靠指标的几何意义	158
5.3	非正态相关随机变量结构的可靠度分析方法	161
5.4	非正态相关随机变量结构可靠度的实用分析方法	173
第6章	结构可靠度分析的二次二阶矩方法	183
6.1	独立随机变量结构可靠度的二次二阶矩方法	184
6.2	相关随机变量结构可靠度的二次二阶矩方法	201
第7章	原始随机空间内结构可靠度的分析方法	209
7.1	原始随机空间内可靠度的一次分析方法	210
7.1.1	失效概率的基本表达式	210

7.1.2 最佳展开点的确定	212
7.2 原始随机空间内可靠度的二次分析方法	227
第8章 多失效模式结构可靠度的分析方法	234
8.1 结构体系的形式及特点	235
8.2 结构体系失效概率的基本表达式	237
8.2.1 一般表达式	237
8.2.2 结构体系失效概率对相关系数的敏感性	243
8.2.3 几种特殊情况的失效概率表达式	244
8.3 Hohenbichler 方法	251
8.4 条件可靠指标方法	256
8.5 逐步等效平面方法	263
8.5.1 等效平面的概念	263
8.5.2 两个极限状态面的等效	265
8.5.3 串联结构体系失效概率的计算	268
8.6 区间估计方法	276
8.6.1 宽界限法	277
8.6.2 窄界限法	277
8.6.3 两失效模式同时失效的概率	278
第9章 模糊失效准则结构的可靠度分析方法	282
9.1 模糊数学的基本概念	283
9.1.1 模糊集合与隶属函数	283
9.1.2 模糊子集的表示和隶属函数的确定方法	285
9.1.3 λ -截集的概念	289
9.1.4 模糊事件的概率	291
9.2 模糊失效准则结构的可靠度	293
9.2.1 结构模糊可靠度的基本概念	293
9.2.2 结构模糊可靠度的计算	296
9.3 多失效模式结构的模糊可靠度	300

第 10 章 结构可靠度分析的蒙特卡罗方法	307
10.1 随机数的产生和随机变量的抽样	309
10.1.1 随机数的产生	309
10.1.2 随机变量的抽样	314
10.2 结构可靠度模拟的基本方法	325
10.3 结构可靠度模拟的重要抽样方法	335
10.3.1 重要抽样的概念	335
10.3.2 直接重要抽样法	339
10.4 更新重要抽样法	350
10.4.1 一次更新重要抽样法	350
10.4.2 二次更新重要抽样法	354
10.5 渐近重要抽样法	359
10.5.1 渐近重要抽样的基本原理	360
10.5.2 直角坐标系中的渐近重要抽样方法	364
10.5.3 曲线坐标系中的渐近重要抽样方法	378
10.6 方向抽样法	389
10.6.1 均匀方向抽样法	390
10.6.2 重要方向抽样法之一	395
10.6.3 重要方向抽样法之二	403
10.7 蒙特卡罗方法的对比分析	412
附录	
附录 A 概率计算的近似公式	417
附录 B 与本书内容有关的数值计算方法	424
附录 C 标准正态分布函数值	431
附录 D 爱卡方 χ^2 概率分布函数值	437

CONTENTS

Preface

Chapter 1 Introduction	1
1.1 Development of structural reliability theories and its computational method	3
1.1.1 First-Order Second-Moment method	3
1.1.2 Second-Order Second-Moment method and integral method	6
1.1.3 Other methods	7
1.1.4 Structural system reliability	8
1.1.5 Monte-Carlo simulation for structural reliability	12
1.2 Main content of this book	14
Chapter 2 Concepts and principles of structural reliability	26
2.1 Uncertainties in structural analysis	26
2.2 Random variables and stochastic processes in structure design	29
2.2.1 Random variables	29
2.2.2 Random vectors	35
2.2.3 Stochastic processes	37

2.3	Actions and action effects	41
2.3.1	Actions	42
2.3.2	Action effects	47
2.3.3	Action effect combination	48
2.4	Structural resistances	52
2.4.1	Three kinds of uncertainties related to resistances	52
2.4.2	Probability distribution of resistances	53
2.5	Limit state of structures	54
2.6	Structural reliability and reliability index	58
2.6.1	Structural reliability	58
2.6.2	Reliability index	63
Chapter 3 First-Order Second-Moment method for structural reliability analysis		68
3.1	Mean point method	68
3.2	Design point method	75
3.2.1	Cases with normal random variables	76
3.2.2	Cases with non-normal random variables	96
Chapter 4 General method for reliability index calculation		122
4.1	Limit step length iteration method	123
4.1.1	Basic formula for iteration	123
4.1.2	Convergence of iteration	126
4.1.3	Normal tail approximation method	133
4.2	General calculation method	138
4.2.1	Basic formula for iteration	138
4.2.2	Convergence of iteration	141

Chapter 5 Reliability analysis method for structures with dependent random variables	154
5.1 Reliability analysis method for structures with dependent normal random variables	154
5.2 Geometric interpretation of reliability index in dependent random space	158
5.3 Reliability analysis method for structures with dependent non-normal random variables	161
5.4 Practical reliability analysis method for structures with dependent non-normal random variables	173
Chapter 6 Second-Order Second-Moment method for structural reliability analysis	183
6.1 Second-Order Second-Moment method for structures with independent random variables	184
6.2 Second-Order Second-Moment method for structures with dependent random variables	201
Chapter 7 Structural reliability analysis method in original random space	209
7.1 First-Order reliability analysis method in original random space	210
7.1.1 Basic expression of failure probability	210
7.1.2 Determination of the best expanding point ...	212
7.2 Second-Order reliability analysis method in original random space	227
Chapter 8 Reliability analysis methods for structures with multi-failure modes	234
8.1 Category and characteristics of structural systems	235

8.2	Basic expression of structural system failure	
	probability	237
8.2.1	General expression	237
8.2.2	Sensitivity of structural system failure	
	probability to coefficient of correlation	243
8.2.3	Failure probability formulae in some special	
	cases	244
8.3	Hohenbichler method	251
8.4	Failure-condition reliability index method	256
8.5	Step-by-step equivalent plane method	263
8.5.1	Equivalent plane	263
8.5.2	Equivalence of two limit state planes	265
8.5.3	Calculation of failure probability of serial	
	structural systems	268
8.6	Bound estimate method	276
8.6.1	Wider bound method	277
8.6.2	Narrow bound method	277
8.6.3	Joint probability of two dependent failure	
	modes	278
Chapter 9 Reliability analysis method for structures		
	with fuzzy failure criteria	282
9.1	Basic knowledge of fuzzy mathematics	283
9.1.1	Fuzzy sets and membership function	283
9.1.2	Expression of fuzzy subsets and determination	
	of membership function	285
9.1.3	Concept of λ -cut sets	289
9.1.4	Probability of fuzzy event	291
9.2	Reliability of structures with fuzzy criteria	293

9. 2. 1	Basic concept of structural fuzzy reliability	... 293
9. 2. 2	Calculation of structural fuzzy reliability	..... 296
9. 3	Fuzzy reliability of structures with multi-failure modes	..... 300
Chapter 10 Monte-Carlo simulation for structural reliability		
	reliability	..... 307
10. 1	Generating of random numbers and sampling of random variables	..... 309
10. 1. 1	Generating of random numbers	..... 309
10. 1. 2	Sampling of random variables	..... 314
10. 2	Basic method of structural reliability simulation	..... 325
10. 3	Importance sampling for structural reliability simulation	..... 335
10. 3. 1	Concept of importance sampling method	..... 335
10. 3. 2	Crude importance sampling method	..... 339
10. 4	Update importance sampling method	..... 350
10. 4. 1	First-Order update importance sampling method	..... 350
10. 4. 2	Second-Order update importance sampling method	..... 354
10. 5	Asymptotic importance sampling method	..... 359
10. 5. 1	Basic principle of asymptotic importance sampling	..... 360
10. 5. 2	Asymptotic importance sampling in rectangular coordinates	..... 364
10. 5. 3	Asymptotic importance sampling in curvilinear coordinates	..... 378

10.6	Directional sampling method	389
10.6.1	Uniform directional sampling method	390
10.6.2	First directional importance sampling method	395
10.6.3	Second directional importance sampling method	403
10.7	Comparison and analysis of various Monte-Carlo simulations	412

Appendix

Appendix A	Approximate formulae for probability calculation	417
Appendix B	Numerical methods used in this book	424
Appendix C	Standard normal table	431
Appendix D	Chi-square table	437