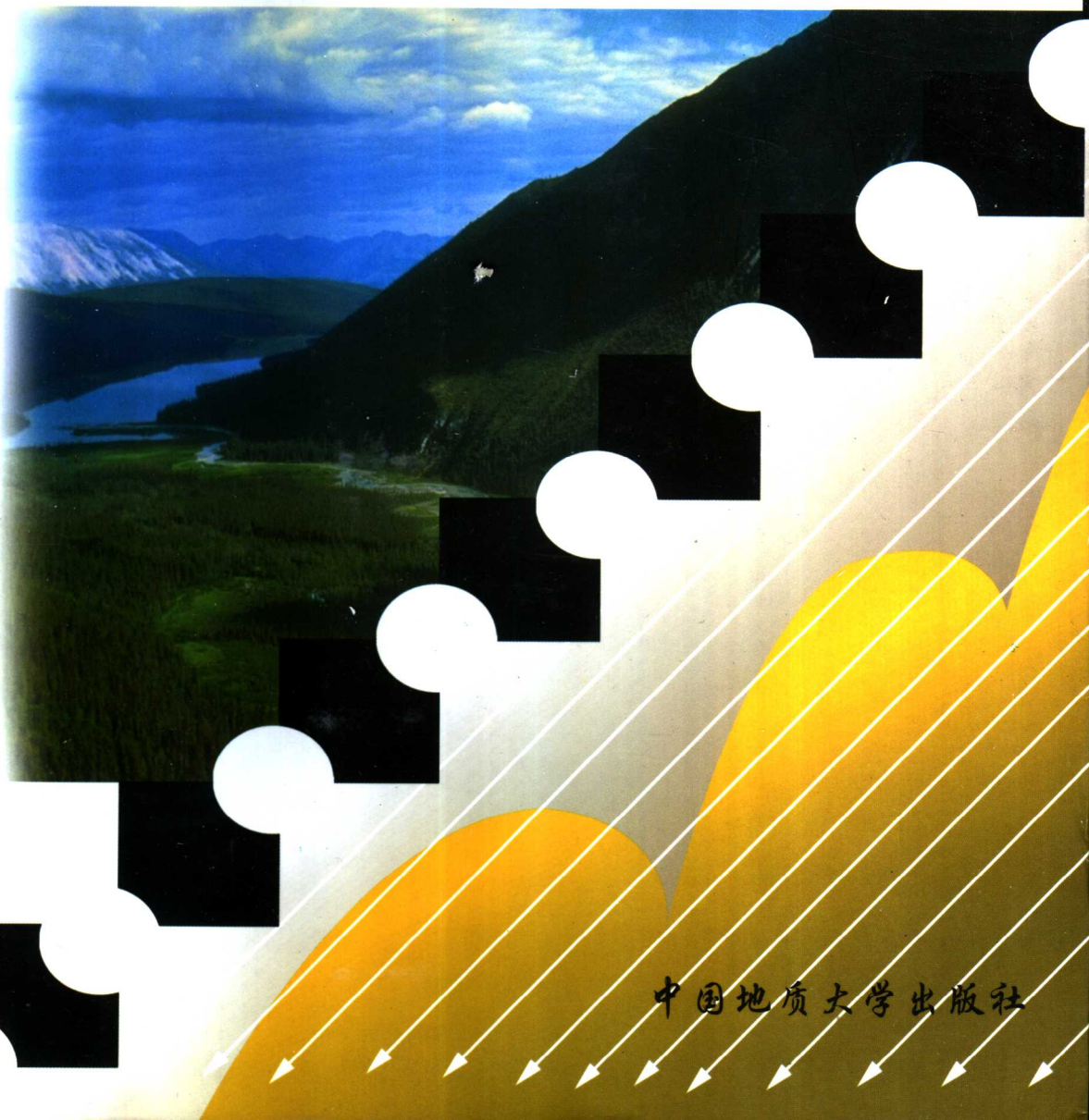


斜坡稳定性 概率分析的理论与应用

罗文强 黄润秋 张倬元 著



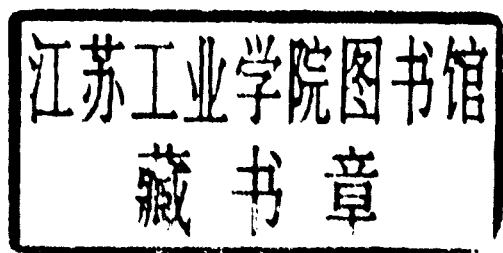
中国地质大学出版社

413.6
65

本书由国家自然科学基金(编号:90102002)及
中国地质大学(武汉)学术著作出版基金资助出版

斜坡稳定性概率分析的 理论与应用

罗文强 黄润秋 张倬元 著



中国地质大学出版社

图书在版编目(CIP)数据

斜坡稳定性概率分析的理论与应用/罗文强,黄润秋,张倬元著. —武汉:中国地质大学出版社,2003.6

ISBN 7-5625-1768-1

I. 斜…

II. ①罗…②黄…③张…

III. 概率分析-理论与应用-斜坡稳定

IV. TB114

斜坡稳定性概率分析的理论与应用 罗文强 黄润秋 张倬元 著

责任编辑:方 菊

校 对:阮一飞

责任校对:胡义珍

出版发行:中国地质大学出版社(武汉市洪山区鲁磨路31号)

邮 编:430074

电 话:(027)87482760 传 真:87481537

E-mail: cbo@cug.edu.cn

开 本:787 mm×1092 mm 1/16

字 数:192千字 印 张:7.5

版 次:2003年6月第1版

印 次:2003年6月第1次印刷

印 刷:湖北地矿印业公司

印 数:1—260册

ISBN 7-5625-1768-1/TB·6

定 价:20.00元

如有印装质量问题请与印刷厂联系调换

序

中国乃至世界范围内,由于滑坡灾害的频发,造成了巨大的人员伤亡和财产损失。同时,随着国民经济的快速发展,大型工程建设的数量和复杂程度日益增加,所涉及斜坡稳定性问题也越来越复杂。由于岩土体客观上存在着许多不确定性和相关性,因此建立在不确定概念之上的概率分析(可靠性分析)受到国内外广泛的关注,运用概率理论(可靠性理论)研究斜坡系统的稳定性成为一个重要的研究课题。可靠性理论可有效地解决斜坡系统内的不确定性和相关性,更精确地对斜坡系统进行稳定性分析,给出滑坡灾害破坏的可能性,为滑坡灾害治理提供优选的最佳方案。为大型边坡工程设计合理的保证率和风险水平,是对传统安全系数的进一步扬弃和升华。《斜坡稳定性概率分析的理论与应用》一书正是上述研究领域富有成果的探索和总结。

全书从概率(可靠性)理论、系统科学出发,结合斜坡系统的稳定性问题,对概率方法引入的必要性、单体斜坡系统概率分析方法、区域斜坡系统的概率分析方法及研究趋势进行了全面的论述;特别对单体斜坡系统概率计算模型和区域斜坡系统概率计算模型及模型的精度和适宜性问题进行了详尽的研究,提出了函数连分式渐近法、最大熵密度函数法、空间可靠性评价预测方法、神经网络方法、模糊(数学)综合评判方法及 Morishita 播散指数等许多新的模型;对定量地给出滑坡风险评价的原理方法、滑坡保险费率的计算公式、斜坡系统与单元(主控因素)逻辑结构关系及可靠度的组合关系、可靠度阈值的有效确定、建立传统的安全系数与可靠指标相结合的二元指标体系等方面进行了探索性的研究,取得了一些开创性的成果,具很高的研究水平。

全书突出学科交叉,理论联系实际,每一种方法都配有研究实例,适用面较广,可供有关专业的大学生、研究生、教师、科研与工程技术人员阅读。研究成果对滑坡灾害的防治和大型边坡工程建设的安全性、经济实用性提供了有力的保障,在环境评价、矿山边坡、水电工程、道路工程中均有广阔的应用前景。我确信本著作的出版,对复杂斜坡系统的可靠性研究会起到进一步的推动作用。

中国工程院院士

刘广润

2003年5月30日

前 言

在长期的工程实践中,人们认识到:斜坡岩土体是地质体的一部分,是长期地质作用的产物,它所涉及的工程地质条件及岩土体性质参数是复杂的、多变的、随机的、相关的,滑坡的地质过程、形成条件、诱发因素也是复杂的、多变的、随机的、相关的。滑坡的孕育及发展受控于多种因素,而这些因素均为变量,不能精确地知道它们的取值。因此,斜坡稳定性的研究是一个非常复杂的问题。

斜坡稳定性分析的传统方法是安全系数法,它是建立在确定性概念之上,应用时间较长,范围较广,在实践中积累了丰富的经验。但这种方法最大的缺点是:没有考虑斜坡系统的不确定性和相关性。而这些不确定性和相关性,特别是参数的不确定性(即参数的变异性)和相关性对斜坡稳定性分析的灵敏度是相当高的。为了有效地解决岩土体系统内的不确定性和相关性,自20世纪70年代以来,建立在不确定性概念之上的概率统计理论和方法被引入斜坡稳定性研究之中,为斜坡稳定性研究开辟了新的领域,极大地丰富了滑坡学的内容和研究方法,取得了一定的进展。目前常用的可靠性分析即是其中有关计算方法方面的一个重要课题,在世界范围内,许多国家运用可靠性理论修改规范,指导设计。

全书共分六章。第一章论述了斜坡稳定性可靠性理论和方法的研究背景、研究意义及研究现状、存在问题、研究思路。第二章系统介绍了可靠性理论在斜坡的稳定性研究中应用的原理、方法及研究实例。主要包括模拟实验的 Monte Carlo 模拟方法、近似概率方法的一次二阶矩法(FOSM)、统计矩法(Rosenblueth)、函数连分式渐近法、最大熵密度函数法,简介了马氏链方法。第三章介绍了利用概率统计理论分析降雨诱发滑坡的模式及降雨、人类工程活动、地震等多重因素诱发下滑坡系统的可靠度。第四章介绍了区域斜坡系统的可靠性研究方法,包括:信息量法、回归分析方法、空间可靠性评价预测、神经网络方法及 Morishita 播散指数。第五章从理论上定量地给出了滑坡风险评价的原理、方法和主要概念的定义。第六章是研究总结和研究展望。

本书是对斜坡稳定性概率分析已有成果和笔者研究工作的系统总结,其主体是第一作者攻读博士与博士后期间的主要研究成果。感谢指导教师张倬元教授、黄润秋教授、王士天教授的亲切关怀和悉心指导,感谢晏同珍教授、唐辉明教授的关心和指导,感谢刘汉超教授、聂德新教授、王兰生教授、万新南教授、殷坤龙教授、伍法权教授、许模教授、许强教授、易顺民研究员、徐则民教授、晏鄂川博士后、柴贺军博士后、巨能攀博士、向喜琼博士的关心和帮助。龚珏女士为笔者查阅了大量的文献资料,在此表示感谢。

斜坡稳定性概率分析是一个学科交叉的崭新研究领域,需要不断的探索和实践。书中不足及错误之处,敬请有关专家批评指正。

罗文强

2003年5月

III

ABSTRACT

Slope system is a changeable, random, complicated system and is of manifold uncertainty, so it is necessary to introduce the reliability theory in the research on the stability of slope system, which has broad prospects of application.

In this book, the basic principles and methods of reliability to assessing stability of slope were developed, including Monte Carlo simulation method, the first order second moment method, point estimate method, maximum entropy density function and Markov's chain. The continued fraction approximation was presented in slope reliability analysis; this method is suitable for implicit function and effectively combines safety factor with slope reliability analysis. Foregoing main methods are compared using same example and results are unanimous.

Mechanism, statistical regular and study methods of effects of rain and groundwater on slope stability were presented. Precipitation induced landslides were divided into long rain and torrential rain induced slide. The reliability of landslide induced by precipitation, human engineering activities, earthquake was deduced.

The methods of information theory and regression analysis are compared and results are consistent. Based on failure probability, spatial reliability prognoses of landslides were expounded, it can surmount the deficiency of present standard of grades which are relative and fuzzy. It was introduced that application of Artificial Neural Network and Fuzzy Mathematics method in slope reliability of reservoir area of the Three Gorges Project. Morishita spread index to describe spatial dispersion of individual were introduced into the study of temporal and spatial distribution characteristics of landslides, it can overcome the shortcoming hypothesis which distribution of landslides is random. Temporal and spatial distribution characteristics of more than 10^5m^3 landslides in south Shanxi and Ganshu province were deduced.

The principle, method and main conceptions of landslide risk assessment were quantitatively presented in theory. A conception of unit risk was advanced. Compared research information in the world, acceptable risk of landslide hazard was inferred. Formula on ratio of insurance premium of landslide hazard was deduced.

The future research direction was put forward.

目 录

1 绪论	(1)
1.1 斜坡系统可靠性研究的背景及意义	(1)
1.2 斜坡可靠性研究现状	(5)
1.3 主要研究内容和研究思路	(7)
2 斜坡可靠性方法和模型研究	(9)
2.1 Monte Carlo 模拟方法	(9)
2.2 一次二阶矩方法	(18)
2.3 Rosenbluth 方法	(28)
2.4 函数连分式渐近法	(31)
2.5 最大熵密度函数法	(37)
2.6 马氏链方法	(42)
3 滑坡影响因素的概率分析	(44)
3.1 降雨及地下水对斜坡稳定性影响的一般规律和研究方法	(44)
3.2 降雨诱发滑坡的概率分析	(48)
3.3 多重影响因素诱发下滑坡系统的可靠分析	(53)
4 区域斜坡系统的可靠性研究	(56)
4.1 区域斜坡不稳定性空间预测的概率统计方法	(57)
4.2 区域斜坡不稳定性空间可靠性评价预测方法	(61)
4.3 人工神经网络方法	(67)
4.4 模糊综合评判方法	(73)
4.5 Morishita 播散指数在滑坡时空分布特征研究中的应用	(77)
4.6 判别分析在区域斜坡稳定性中的应用	(79)
4.7 回归分析在区域斜坡稳定性中的应用	(85)
4.8 聚类分析在区域斜坡稳定性中的应用	(89)
5 崩滑地质灾害的风险性评价及管理	(94)
5.1 滑坡灾害风险评价的主要概念及定义	(95)
5.2 滑坡灾害可接受的风险水平	(97)
6 研究展望	(102)
6.1 全书总结	(102)
6.2 研究展望	(103)
参考文献	(105)

Contents

1	Introduction	(1)
1.1	Background and significance of research on reliability of slope system	(1)
1.2	Present research on slope reliability	(5)
1.3	Main research contents and research thought	(7)
2	Research on methods and models of slope reliability	(9)
2.1	Monte Carlo simulation method	(9)
2.2	The first-order second-moment method	(18)
2.3	Rosenblueth estimation method	(28)
2.4	Continued fraction approximation method	(31)
2.5	Maximum entropy density function method	(37)
2.6	Markov's Chain method	(42)
3	Probabilistic analysis of factors influenced landslide	(44)
3.1	Mechanism, statistical regular and study methods of effects of rain and groundwater on slope stability	(44)
3.2	Probabilistic analysis of rain induced landslide	(48)
3.3	Reliability analysis of multi-factors induced landslide	(53)
4	Research on reliability of regional slopes system	(56)
4.1	Statistical method of spatial prediction of regional slopes instability	(57)
4.2	Reliability method of spatial prediction of regional slopes instability	(61)
4.3	Artificial neural network method	(67)
4.4	Fuzzy mathematics method	(73)
4.5	Application of Morishita spread index in temporal and spatial distribution characteristics of landslides	(77)
4.6	Application of discriminant analysis in regional slopes stability	(79)
4.7	Application of regression analysis in regional slopes stability	(85)
4.8	Application of cluster analysis in regional slopes stability	(89)
5	Risk assessment and management of landslide disaster	(94)
5.1	Main conception of risk assessment and management of landslide disaster	(95)
5.2	Acceptable risk of landslide disaster	(97)
6	Future research directions	(102)
6.1	Summarization of full text	(102)
6.2	Future research directions	(103)
	References	(105)

1 绪 论

由于可靠性理论可有效地解决岩土体系统内的不确定性和相关性,在世界范围内受到岩土工程界的极大重视,许多国家运用可靠性理论修改规范,指导设计。可靠性理论自 20 世纪 70 年代开始应用于工程地质岩土工程领域中。尤其是近十年来,人们逐渐认识到:不确定性揭示了工程地质现象的本质,是一个新的观念和思维方式(Chowdhury R. N. 等,1993;肖树芳等,1992)。从传统的确定论模式走向确定性与随机性相互补充和结合的思维模式及研究途径已成为工程地质研究方法的显著特点之一。其原因在于拉普拉斯确定论只有在简单或简化后有限条件下才是正确的(晏同珍,1994)。

随着人们对斜坡稳定性系统不确定性和相关性认识的逐步深入,利用可靠性理论进行斜坡稳定性的研究也不断地扩展和提高,取得了较大的进展。目前大量发表的文献资料表明:斜坡系统的可靠性研究已成为工程地质发展过程中新的增长点之一,同时也可以看到:斜坡系统的可靠性研究总体水平不高,还存在许多问题,需要进一步的探索和研究,尚有大片的研究领域需要去开拓。斜坡可靠性理论和方法是概率岩土学(包承纲,1989)的重要组成部分,是可靠性理论同滑坡学相交叉的产物。本章论述了斜坡可靠性理论和方法的研究背景、研究意义、研究现状、研究内容及主要研究思路。

1.1 斜坡系统可靠性研究的背景及意义

斜坡是人类生存和工程活动最基本的自然地质环境之一。在自然力和人的营力作用下,斜坡变形破坏引起地质灾害。这些灾害造成巨大的人员伤亡和财产损失。它的规模小于地震,但其发生频度和涉及范围远远高于和广于地震。所造成的损失仅次于地震(张倬元,1994),已成为我国最重要的地质灾害问题之一(黄润秋等,1996;朱建业,1993)。正是滑坡灾害的严重性,使得斜坡稳定性的研究不断发展。

斜坡稳定性研究最早是从滑坡现象开始的。早期的工作把滑坡作为一种地貌现象加以描述。20 世纪末、21 世纪初伴随发达国家近代工业革命而兴起的大规模土工建设,诱发了大量滑坡,造成了很大的损失。这时,人们把失稳现象提高到与人类工程活动有关的灾害地质过程的高度加以研究。早期研究方法,一是借用土力学极限平衡的概念,根据静力平衡条件计算斜坡极限平衡状态下的稳定性(Fellenius, 1936; Bishop, 1955);二是从斜坡所处的地质条件及滑坡现象上对滑坡发生的环境及机制进行单因素定性分析。20 世纪 60 年代初的瓦依昂滑坡及我国一些水电工程和露采矿山遇到的大型滑坡和岩体失稳事件,使工程地质学家开始认识到:斜坡是一个时效变形体,斜坡的演变是一个时效过程或累进破坏过程。这些认识的基础是现代的岩石力学(黄润秋等,1991)。由此,斜坡稳定性的研究进入模式机制和内部作用研究阶段。进

入 20 世纪 80 年代以来,我国大规模滑坡活动进入了一个新的活跃期,相继发生了盐池河岩崩(1980 年)、长江鸡扒子滑坡(1982 年)、洒勒山滑坡(1983 年)、新滩滑坡(1984 年)、巫溪滑坡(1985 年)、白沙滑坡(1987 年)、溪口滑坡(1989 年)、昭通滑坡(1992 年)、乌江鸡冠岭滑坡(1994 年),仅这些滑坡灾害造成的人民生命损失已超过千人,直接经济损失近亿元,善后处理及事后整治费用近十亿元,由于灾害对社会所带来的影响(如中断水、陆路交通)所产生的间接经济损失则更是无法估量(黄润秋等,1996;1991)。在我国实施沿海发展战略后,中西部将是下一步开发和发展的重点。举世瞩目的三峡工程及长江、黄河上游拟建的一系列大型水力发电工程、南水北调工程、山区铁路工程、大型露天矿工程等一系列跨世纪的宏伟工程已投入或将投入建设。这些工程的数量和复杂程度都是前所未有的,它们的修建极大地改善我国的综合国力,但毫无疑问地将带来更大规模和更大范围的滑坡灾害和其他地质灾害(张倬元,1994)。解决这些问题的迫切性成为近期斜坡稳定性研究蓬勃发展的巨大动力。20 世纪 80 年代以来,随着计算理论和计算机科学的长足发展,定量的数值模拟技术广泛应用于斜坡稳定性的研究。同时学科之间的相互渗透和现代科学一系列新的理论方法,如:系统论、现代概率统计(可靠性理论)、模糊数学(灰色理论)、信息论、协同学、分形理论等引入斜坡稳定性的研究之中,大大提高了斜坡稳定性研究的理论水平、应用水平。

从斜坡稳定性分析发展趋势看,有两大特点:在传统的刚体平衡二维平面分析的基础上,向弹塑性有限元分析及三维稳定性计算方向扩展;已逐步引入概率模型并尝试将确定模型与概率模型融合起来。事实上,对于复杂的地质体来讲,其本身是具有灰色性、复杂性特点,不可能得到其确定解、最优解,理想的结果是求取基于确定模型与概率模型相结合的满意解。模糊数学创始人 Zadeh L. A. 指出:“当系统的复杂性日趋增长时,我们作出系统特性精确而有意义的描述的能力将相应降低,直至达到这样一个阈值,一旦超过它,精确学和有意义将变成两个几乎排斥的特性”(汪培庄,1983)。此被认为精确性和复杂性的互克性原理。此原理说明,对于一个复杂的系统,当我们无法对系统进行精确描述的时候只能作出降低要求和有意义的描述。而可靠性理论正是这一思维范畴的数学理论之一。

斜坡稳定性分析的传统方法是安全系数法,它是建立在确定性概念之上,应用时间较长,范围较广,在实践中积累了丰富的经验。但这种方法最大的缺点是:没有考虑参数和模型的不确定性。而这些不确定性,特别是参数的不确定性(即参数的变异性)对斜坡稳定性分析的灵敏度是相当高的。在斜坡的稳定性评价中,数学模型、基本变量及预测结果都带有某种不确定性。其中主要有以下三种类型(祝玉学,1993):

(1) 物理性质的不确定性。

在长期的工程实践中,人们认识到:斜坡岩土体是地质体的一部分,是长期地质作用的产物,它所涉及的工程地质条件及岩土体性质参数是复杂的、多变的、随机的、相关的(包承纲,1989),滑坡的地质过程、形成的条件、诱发因素也是复杂的、多变的、随机的、相关的。斜坡是否发生大变形和破坏,主要取决于斜坡岩土体不连续面的形态、强度和变形性质、地下水压和动力荷载的实际值。然而,却不能精确地知道这些参数的真值,因为它们都是变化量,这是历史和现代的地质作用过程和作用产物的不确定性,它反映了诸参数固有的空间变化性。就是说,由于岩土体的组成、结构、力学效应是变化的、不均匀的、各向异性的,因此具有显著的随机性。例如:对同一组粘土试样,在同一实验室、同一试验仪器、同一试验条件下测定抗剪强度,结果也有一定离散,其中摩擦角 φ 值可能离散 $\pm 25\%$,粘聚力 c 值可能离散 $\pm 50\%$,给定正应力的抗剪强度值变化约 $\pm 30\%$ 。这些说明参数具有变异性。变异性由变异系数刻画,用符号“ δ ”记,它

等于标准差与期望值的比值,反映了参数取值的离散性。据徐建平等在1999年的研究,红砂岩弹性模量和泊松比的变异系数为0.25,抗压和抗拉强度的变异系数分别为0.089和0.104,粘聚力和摩擦角的变异系数分别为0.317和0.171;泥质软弱层粘聚力和摩擦角的变异系数分别为0.384和0.297。

表1.1和图1.1、图1.2是罗文强等在1996年就某斜坡参数 c (粘聚力)、 f (摩擦系数)的变异性对斜坡稳定的影响研究。在传统的定值方法下,斜坡的安全系数均相同(1.14),但其破坏概率是不一样的,变异系数越大,破坏概率越大。另一种物理性质不确定性是参数具有相关性。实验和工程实践表明, c 和 f 是相关的两个变量。一般 c 值增大, f 值减小,反之也成立。即 c 和 f 呈负相关。但某些岩土体也呈正相关。 c 和 f 的相关系数在 $-0.2 \sim -0.7$ 之间(切鲁比尼C.等,1994)。坝基和混凝土与岩石抗剪断试验 f 与 c 的相关系数为 $-0.85 \sim -1$ 之间(光耀华,1994,1995;严春风等,1997)。表1.2和图1.3是某斜坡中 c 和 f 的相关性对稳定性的影响(罗文强等,1996)。结果是安全系数相同,但是其破坏概率不同,相关系数越大,破坏概率越大。

表 1.1 c 、 f 的变异性对破坏概率的影响($\rho_{f,c}=0$)

c 的变异系数 δ_c	f 的变异系数 δ_f	c 的均方差 σ_c (kPa)	f 的均方差 σ_f	安全系数 K	破坏概率 P
0.24	0.03	96	0.016	1.14	0.16
0.24	0.095	96	0.05	1.14	0.18
0.24	0.16	96	0.085	1.14	0.21
0.39	0.095	156	0.05	1.14	0.28
0.1	0.095	40	0.05	1.14	0.04

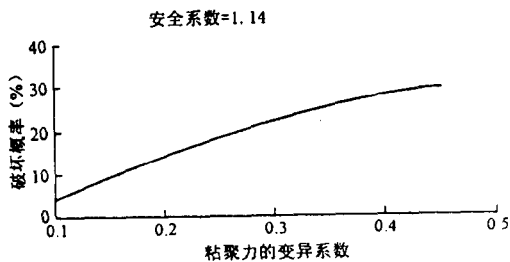


图 1.1 破坏概率与粘聚力变异系数的关系曲线

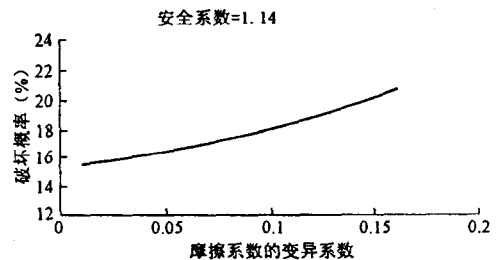


图 1.2 破坏概率与摩擦系数变异系数的关系曲线

表 1.2 c 、 f 的相关性对破坏概率的影响

相关系数 $\rho_{f,c}$	c 的变异系数 δ_c	f 的变异系数 δ_f	c 的均方差 σ_c (kPa)	f 的均方差 σ_f	安全系数 K	破坏概率 P
-0.5	0.24	0.095	96	0.05	1.14	0.14
0	0.24	0.095	96	0.05	1.14	0.18
0.4	0.24	0.095	96	0.05	1.14	0.21

(2) 统计方法的不确定性。

在斜坡稳定性分析中,对参数进行测定和试验得到有限的数数据,然后对这些数据进行统计推断,推断结果与样本及样本容量密切相关,样本和样本容量不同,估计的参数也不相同;统计推断的方法不同,结果也不尽相同。由于斜坡体系的不确定性,我们只能从统计结果推断真值,而不能求得真值。因此,对一组数据,可以认为参数也是随机变量,其不确定性依赖于样本数据和已有的知识,具有一定人为的不确定性(Kim K.

等,1995;严春风,1997),这种不确定性叫做统计不确定性。它主要是由于信息误差和信息缺乏而产生的,可通过适当加大样本容量,克服统计不确定性。

(3) 模型不确定性。

建立在极限平衡状态下的各种条分法,它们都是在对实际问题理想化的数学力学抽象下构造的。不同的模型对条块间切向力 T 和水平力 E 进行了不同形式的假设。Fellenius 法假定 $T = E = 0$,简化 Bishop 法假定 $T = 0$,Morgentor-price 法假定 T 与 E 有某种函数关系,Spencer 法假定 T 与 E 比例为已知。显然,每一种方法总有某种程度的局限性。实际上,在引入计算模型时,就引入了不确定性。模型的不确定性是由简化假设和未知边界条件而产生的,也是由未包含在模型中的其他变量和它们之间的相互关系的未知效应产生的。研究表明:岩土工程中变异性和相关性在概率计算中的影响远远超过模型的不确定性(包承纲,1989)。因此本书讨论的重点是:参数的变异性和相关性对斜坡稳定性的影响。另外一种不确定性是斜坡破坏模式的多样性和不确定性。

在实际工程中,传统的定值方法,由于没考虑不确定性,常出现如下两种错误:一种是计算的安全系数大于 1,而实用中不稳定,发生破坏,造成重大损失;另一种是计算的安全系数小于 1,而实用中保持稳定,没发生破坏,使边坡的稳定性评价过于保守,造成巨大的浪费。在中值的安全系数计算中,安全系数是 1.25,这并不意味着比安全系数是 1 时稳定程度高 25%,它们无法进行比较。很明显,取相同安全系数的两个斜坡其真实安全度不可能一样,同一斜坡的不同破坏形式下安全系数相差较大。例如加拿大哥伦比亚河上的 Mica 水电站的 Dutchmen 斜坡,由于加固设计是基于十分详尽的地质勘察和位移监测,因此安全系数仅取 1.06(远低于建议的 1.5),位移长期监测揭示该边坡是处于稳定之中^①。

在进行滑坡的风险评价中,传统的定值方法是无法给出滑坡(包括破坏和未破坏的)破坏程度、风险水平,对防灾、减灾不能提供可靠的依据。对于降雨、地震、人工活动所诱发的滑坡,定值法无法给出诱发滑坡的可能性大小即超越概率。由于定值方法不能提供滑坡的风险水平,也就很难开展滑坡的保险业务。对于滑坡治理的多种方案优选,传统的定值方法也是无能为力的。在滑坡的治理工程多种方案决策分析中,不同的保证率,意味着不同的效益和损失。最大的效益、最小的损失所对应的风险水平为最优设计(罗国煜等,1992)。为很好地解决上述问题,建立在不确定概念之上的可靠性分析方法自然地引入斜坡的稳定性评价之中。应用严格的概率度量结构,可很好地处理参数和模型的不确定性,有效地确定滑坡的风险水平,制定相

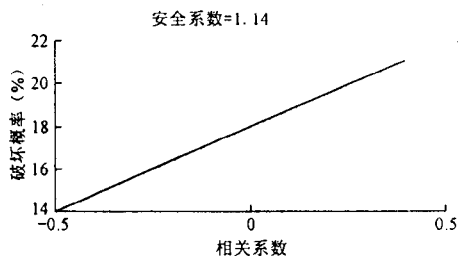


图 1.3 破坏概率与相关系数的关系曲线

① 严春风. 岩质边坡可靠度分析方法及其二滩金龙山滑坡分析中的应用(博士学位论文). 重庆建筑大学, 1999. 1

适应的防灾、减灾的方案和措施。可靠性方法的引入,并不是要排除传统的定值方法,而是要将定值方法和可靠性方法进行有机的结合,两种方法互为补充,互为映证,使得斜坡稳定性评价更加科学化、精确化,更好地解决实际问题。

1.2 斜坡可靠性研究现状

1.2.1 研究现状

自 20 世纪 70 年代以来,概率统计理论在工程地质、岩土工程中得到广泛的应用,发展成为一个新的分支概率岩土学。目前常用的可靠性分析即是其中有关计算方法方面的一个重要课题。在斜坡稳定性的概率分析中,可靠性分析是其中主要的方法和研究课题。可靠性理论和可靠性工程研究已成为世界各国工业领域的热门话题之一。仅在美国,从事这方面的工程技术人员就已达五十多万人,其应用可见一斑。可靠性数学起源于 20 世纪 30 年代,最早研究是机器维修,更新问题。代表为威布尔(Weibull)、龚贝尔(Gumbell)、爱泼斯坦(Epstein)(曹晋华等,1986;王珍熙,1991;吴世伟,1990)。在第二次世界大战后,工业、军事、航空、航天技术日益复杂因而受到重视,这对于经济效益的提高、避免人身事故和财产的损失起到重大的作用。尔后逐渐推广到机械工程、土木工程、道路工程、水利水电工程、矿山工程等领域。自 20 世纪 70 年代应用于边坡工程中。由于世界范围内岩土工程技术界的重视,许多国家运用可靠性理论修改规范,指导设计。基于可靠性理论的工程随机设计和分析方法已在结构工程、港口工程、水利水电工程等一系列土木工程领域中被广泛应用。《工程结构可靠度设计统一标准》、《港口工程结构可靠度设计统一标准》、《铁路工程结构可靠度设计统一标准》、《水利水电工程结构可靠度设计统一标准》等一系列土木工程可靠度技术规范的颁布就说明这一点。

许多学者对斜坡稳定概率分析和可靠性研究作出了卓有成就的贡献(祝玉学,1993)。Nguyen(1985)、光耀华(1992)、张广文(1993)、罗文强(1996)、严春风(1997)等对岩土体参数的概率分布特征、相关关系、参数估计方法进行了研究;Alonso 和 Harr(1976)、包承纲(1984)、高大钊(1985)、姚耀武(1994)等对土质边坡的可靠性进行了典型研究;Memabon(1971)、Kim(1978)、张广文(1992)、Piizgns(1995)等利用 Rosenblueth 方法,一次二阶矩等经典可靠性理论研究二维和三维岩质边坡的滑动问题,求出相应的破坏区、破坏概率、可靠性指标;Yong D. S. (1993)、Mauldon M. (1995)、谢全敏(1992)、Low B. K. (1997)等对关键块体的稳定性进行了可靠性分析,通过受力的极限状态函数计算破坏概率和可靠指标;Chowdhury 和 Griwas A. (1982)、王家臣和骆中州(1992)、李文秀(1996)等对边坡的渐近破坏进行了深入的概率分析;Vanmarcks(1986)、Mark(1987)、张骄培(1992)、姚耀武(1996)、武清玺(1998)等将有限元与可靠性理论相结合,计算出单元和整个边坡的失效概率,可靠指标;由于可靠性模型中极限状态函数为非线性的,郭怀志(1992)、章光(1995)、罗文强(1997)提出了不同条件可靠度的近似计算方法和非线性问题的处理;一些学者对影响边坡稳定的因素进行了可靠性分析,如马特索和格拉斯(Glass)、萨瓦莱(Sarely)、考尔(Call,1978)对其他附加荷载的概率分析等做了有益的探索,谢守益(1992)、王保田(1992)、王家臣(1996)等分析地下水对边坡可靠度的影响,谢守益(1992)等分析地震对边坡可靠度的影响;王光运和刘小彬(1995)、柴贺军和黄润秋等利用

模糊数学方法,建立模糊可靠度的计算方法;Low B. K. (1997)等结合计算机的应用进行边坡可靠性的智能化研究;刘沐宇(1998)、张社学(1999)等对岩质边坡的可靠性设计进行了研究。澳大利亚 Wollongong 大学 Chowdhury R. (乔伍德赫里)教授在 1992 年新西兰的第六届国际滑坡学术讨论会上,建议推广概率分析的应用,受到与会者的关注(张倬元,1993)。

我国的边坡可靠性研究开展较晚,1983 年,攀枝花钢铁公司石灰石边坡可靠性分析与经济研究分析才作为第一个这个领域的研究成果通过冶金部鉴定。近年来,边坡可靠性研究和应用得到一定发展。“尖山铁矿边坡优化设计方法研究”(“七五”重点科技攻关项目),对可靠性做了全面的、深入的讨论(祝玉学,1993)。马鞍山矿山研究院的祝玉学等在此领域中作了重要的工作。在斜坡稳定性的空间预测中,黄润秋和张倬元(1986、1989)、晏同珍和殷坤龙(1985、1991)、伍法权(1986)等人应用概率理论和方法(数量化方法和信息论方法)对斜坡的区域稳定性进行了深入的研究,取得了重大的进展。近期包承纲(1989)、谢守益(1992)、鲁兆明(1992)、徐卫亚(1995)、章光(1995)、光耀华(1995)、罗文强(1997)、严春风(1997)、徐建平(1999)等对概率方法应用于斜坡的可靠性分析,进行了有益的探索,取得了相应的结果。可以预计,概率分析(可靠性分析)将更加深入、广泛地应用于斜坡的稳定性评价和边坡工程之中,不断地推动学科的进步。概率岩土学将不断地茁壮成长,日益完善。

1.2.2 存在问题

尽管对斜坡系统的可靠性研究,国内外给予了越来越多的重视,已成为一个重要的研究领域和热门话题,但是还不能像结构工程那样广泛地应用于工程实践中,很好地解决工程实际问题。主要原因是:由于实际的斜坡岩土体结构和环境因素比较复杂,斜坡系统稳定的主要影响因素的概率分布特征还不能正确地求得,主控因素自身及相互作用的可靠度研究有待于开展;影响斜坡系统稳定的主控因素与系统的逻辑结构及可靠度的组合研究尚属空白,致使可靠度的阈值体系还没能建立,这个问题是先进的可靠性理论在应用中严重滞后的主要原因。同时人们往往惯用定势思维方式,过多地信赖几十年发展起来的观察法,总认为对自己过去所用的传统方法有经验,有把握,而对新的方法抱有回避、顾虑、抵触情绪。(包承纲,1989)甚至认为可靠性方法在数学上太难,不会在复杂的斜坡工程中取得突破性进展。因此可靠性方法应用于实际问题,还需走一段艰苦的路程。

应用可靠性分析方法,进行斜坡的稳定性评价需要准备的数据较多,所包含信息量较大。需要正确的估计参数的分布类型,根据实际中的条件和问题选择不同的概率方法,输入相应的正确的概率模型,否则出现所计算的破坏概率与实际问题相距甚远,而毫无价值。忌生搬硬套,要熟悉具体的地质模型和可靠性方法。目前,一些可靠性分析模型中,夸大的破坏概率令人置疑。

在区域性群体斜坡稳定性评价中,还未能用破坏概率作指标对斜坡稳定性进行空间预测,难以进行滑坡的风险性分析。随着经济建设的深入,滑坡的风险性分析,特别是城镇中滑坡风险分析,对(斜)滑坡评价的安全性、实用性、时效性提出了更高的要求。目前的滑坡风险分析中贫乏的定量分析,难以为防灾减灾制定相适宜的政策法规服务。需从概率度量结构,结合信息工程理论(如地理信息系统、遥感技术等)定量地进行滑坡风险分析,寻求人们可接受的风险水平,以此作为设计和治理边坡的工程标准之一。

1.3 主要研究内容和研究思路

1.3.1 研究内容

(1) 绪论。

主要内容:论述了斜坡稳定性可靠性理论和方法的研究背景、研究意义及研究现状、研究思路、存在问题。

(2) 斜坡可靠性模型研究。

主要内容:系统介绍了可靠性理论在斜坡的稳定性研究中应用的原理、方法及研究实例。主要包括模拟实验的 Monte Carlo(蒙特卡罗)模拟方法,近似概率方法的一次二阶矩法(FOSM)、统计矩法(Rosenblueth)。详述了这些方法的计算步骤、应用条件和研究实例。在斜坡的可靠性研究之中,引入了函数连分式渐近法,其特点是计算速度快、简捷、精度高,有效地将斜坡稳定性评价的定值方法和概率评价有机地相结合。基于信息熵原理,给出了最大熵密度函数法。该方法的特点是充分利用了随机变量的高阶矩信息,比仅利用期望和二阶矩法更为合理;同时,对基本随机变量的概率分布没有特别要求,避免了在一次二阶矩法迭代计算过程中,均需在迭代点处对非正态随机变量进行近似的当量正态化处理的缺陷;求解精度较高,特别适用于基本随机变量服从非正态分布的岩土工程可靠度计算,具有一定的应用前景。最后简介了马氏链方法在可靠性分析中的应用。

(3) 滑坡影响因素的概率分析。

主要内容:论述降雨、地下水对斜坡稳定性影响的作用机理、统计规律、研究方法。利用概率统计理论分析了降雨诱发滑坡的两种模式:久雨诱发和暴雨诱发及相应的超越概率、可靠度;基于系统与单元的逻辑组合框图,分析了降雨(地下水)、人类工程活动、地震等多重因素诱发下滑坡系统的可靠度。

(4) 区域斜坡系统的可靠性研究。

主要内容:对比研究了目前斜坡稳定性空间预测的主要方法——信息量法和回归分析方法;论及空间预测预报的理论基础;利用工程地质类比法、层次分析法求出区域斜坡的破坏概率,以破坏概率为指标,进行区域斜坡的可靠性空间预测。介绍了神经网络方法、模糊数学方法等在斜坡稳定性空间预测中的应用。将描述生物个体空间分布的 Morishita 播散指数,应用于滑坡时空分布形态的研究。

(5) 崩滑地质灾害的风险性评价及管理。

主要内容:从理论上定量地给出了滑坡风险评价的原理、方法和主要概念的定义,提出了单位风险的概念;讨论了滑坡灾害可接受的风险水平;给出了滑坡保险费率的计算公式。

(6) 研究展望。

主要内容:全书总结和研究展望。

1.3.2 研究思路

研究思路如图 1.4 所示。

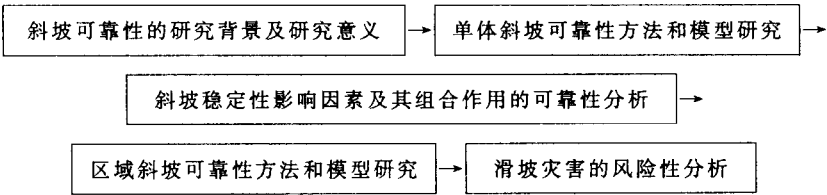


图 1.4 研究思路框图

2 斜坡可靠性方法和模型研究

斜坡稳定性受斜坡体岩土性质、地质构造、岩体结构、地下水分布以及斜坡体外部形态的多种因素控制,其中许多控制因素在不同程度上具有不确定性。为有效地考虑这种不确定性,概率方法被引入斜坡稳定性评价之中。应用概率方法研究斜坡的稳定性,主要是利用概率论一个重要分支——可靠性理论。可靠性理论所用的计算方法包括两类。一类是模拟方法,即蒙特卡罗(Monte Carlo)模拟实验方法;另一类是近似概率方法,包括 Rosenblueth 方法、可靠指标理论等方法。斜坡可靠性分析方法和模型研究是斜坡可靠性理论的基础和重要组成部分,在此领域中,国内外许多学者进行了有意义的探索。除可靠性理论外,正交设计(周曙生,1990)、判别分析(魏安等,1993)、模糊测度(李文秀,1996)等理论方法,在斜坡的稳定性评价中也得到应用。

本章主要介绍斜坡可靠性评价的主要方法、原理、应用条件、范围等。这些方法包括: Monte Carlo 模拟方法、一次二阶矩法、Rosenblueth 矩估计方法。论述了优化理论中最新发展函数连分式渐近法、基于信息熵原理的熵密度函数法、概率数值计算等方法,并配有实例和算例。在介绍可靠性方法的同时,注重比较可靠性方法与传统方法的异同,指出:可靠性方法包括了传统定值评价方法,比传统的方法前进了一大步。但可靠性方法不是取代传统方法,而是将传统定值方法与可靠性方法相结合,互相补充,互相印证,更准确、方便地应用于实际工程中。

2.1 Monte Carlo 模拟方法

2.1.1 概述

蒙特卡罗(Monte Carlo)模拟方法,又称随机模拟法或统计试验法,是一种依据统计抽样理论,利用电子计算机研究随机变量的数值方法。历史上第一个用这种方法的例子,就是有名的浦丰投针问题。距今已有上百年的历史。但由于模拟试验工具的限制,一直没有得到发展,直到 20 世纪 40 年代出现计算机后,这一方法才受到重视。随着处理的问题日益复杂,传统的解析解不能很好地处理,以及计算机迅猛发展,模拟方法随之快速地发展。Monte Carlo 方法源于第二次世界大战期间 Von Neuman 和 Ulam 在对裂变物质的中子随机扩散进行直接模拟中,以世界闻名的赌城蒙特卡罗作为该项研究秘密称呼而得名,很快得到人们的普遍接受。在目前可靠度计算中, Monte Carlo 模拟方法是一个相对精确的方法。近年来,广泛地应用于机械工程、土木工程、水电工程、边坡工程等领域中(祝玉学,1990;高而坤等,1992;罗文强等,