

边坡工程随机分析原理

王家臣 著

煤炭工业出版社

边坡工程随机分析原理

王家臣 著

(全国博士后科学基金部分资助)

煤炭工业出版社

(京)新登字042号

图书在版编目(CIP)数据

边坡工程随机分析原理/王家臣著.-北京:煤炭工业出版社,1996.5

ISBN 7-5020-1295-8

I. 边… II. 王… III. 边坡-道路工程-随机-分析-理论

IV. U416.1

中国版本图书馆CIP数据核字(95)第24073号

边坡工程随机分析原理
(全国博士后科学基金部分资助)

王家臣 著

责任编辑:辛广龙 王秀兰

*

煤炭工业出版社 出版

(北京安定门外和平里北街21号)

北京房山宏伟印刷厂 印刷

新华书店北京发行所 发行

*

开本787×1092mm¹/32 印张7¹/8

字数153千字 印数1—660

1996年5月第1版 1996年5月第1次印刷

书号 4063 G0348 定价12.00元

内 容 提 要

本书系统地阐述了边坡工程随机分析的基本原理和最新研究成果，既有基本方法介绍又有大量工程算例，包括蒙特卡罗方法、概率矩点估计法、一次二阶矩法、岩体不连续面的随机描述、边坡工程系统分析、经济风险分析、岩土性质的空间变异性、边坡三维随机分析、渐进破坏随机分析等内容。本书可供土建、水电、铁道、交通、国防、煤炭、冶金等部门有关技术人员和院校师生参考。

前 言

在许多行业的生产和建设中，经常会遇到岩土开挖边坡、填筑边坡或自然边坡，如何设计、施工和评价这些边坡是有关岩土技术人员所面临的基本问题之一。传统的方法是将影响边坡状态的诸因素看作确定性量，用安全系数作为衡量边坡状态的指标。然而大量试验和工程实践证明，影响边坡状态的因素中有许多具有很大随机性，如边坡岩土的强度参数、外界荷载、地下水、岩土内的各种不连续面等。用确定性方法加以计算评价会带来很大误差，甚至结果失真。为此，从六十年代末以来，在世界范围内广泛开展了岩土不确定性的研究，其中边坡工程是岩土不确定性研究的一个主要应用方面，其研究成果也带动了岩土工程的其它方面。

在早期乃至目前的边坡随机分析中，绝大部分是直接引用了结构可靠性的计算方法，并在计算方法上做了许多努力，对边坡自身问题的关注要少一些。从本质上讲，无论是边坡的确定性分析还是随机分析，其研究重点应该在于边坡工程本身，而不是计算方法。如果将真实客观的边坡问题过度简单化、理想化，那么无论使用什么样巧妙的计算方法都不会得出真实结果。这时获得的结果再美观、再有规律也不能说明什么，是没有意义的。为此本书撰写的基本思想是从边坡工程的客观实际入手，对从结构可靠性工程和概率数学中泊来的各种随机计算方法只做概述性的、通俗性的介绍，不做更严格的推导和赘述，重点在于第3章以后的内容。边坡岩土

是一空间随机介质，边坡破坏具有三维性和渐进性，进行边坡随机分析时，不能忽略这些基本客观事实。另外岩体边坡随机分析时必须与不连续面的随机性相结合，不能将其过量简化。全面系统地考虑这些因素，建立起相适应的随机分析模型和计算方法是今后岩土边坡工程随机研究的重点内容之一。书中试图对这些问题给以合理、实用的分析解答，并建立相应的分析模型。但是由于时间及条件限制，有些研究尚欠深入，有些思想观点也许有不妥之处，欢迎读者提出指正，共同商讨。

在本书撰写和有关内容研究的过程中，得到了中国工程院院士、中国矿业大学钱鸣高教授、骆中洲教授的指导和帮助，阜新海州露天煤矿的朱光生高级工程师、辛建英高级工程师、平庄西露天煤矿的吴学民高级工程师提供了必要的现场资料，在此一并致谢。

作者

一九九六年二月

目 录

第一章 绪论	1
第一节 边坡工程随机分析的必要性	1
第二节 边坡工程随机分析研究现状	7
第二章 边坡工程随机分析的基本方法	11
第一节 边坡工程随机分析的基本原理	11
第二节 随机变量的数字特征及常用分布类型	22
第三节 边坡工程随机分析的基本方法	34
第三章 边坡工程综合随机分析	79
第一节 简单土体边坡和平面滑动破坏概率计算	79
第二节 岩体不连续面的随机描述	87
第三节 倾倒破坏随机分析	99
第四节 边坡工程的系统随机分析	107
第五节 边坡工程经济风险分析原理及随机 分析的几个问题	111
第四章 岩土性质的空间变异性	120
第一节 随机场的局部积分	121
第二节 岩体性质的一维空间变异性	127
第三节 岩体性质的二维空间变异性	140
第四节 岩体性质的三维空间变异性	153
第五章 边坡工程三维随机分析	156
第一节 三维随机分析的极限状态函数和 三维滑体的空间形态	157
第二节 三维滑体长度的随机研究	168
第三节 整体边坡三维随机分析	178

第六章 边坡渐进破坏随机分析	181
第一节 边坡渐进破坏随机分析模型	183
第二节 边坡岩体强度参数的局部平均处理 和模型计算分析	190
第三节 边坡渐进破坏三维随机分析	202
第四节 饱和土体边坡渐进破坏随机模型	210
参考文献	214

第一章 绪 论

第一节 边坡工程随机分析的必要性

边坡工程随机分析，又称为边坡工程可靠性分析或概率分析，是近二十年发展起来的评价边坡工程状态的新方法。它把边坡岩体性质、荷载、地下水、破坏模式、计算模型等作为不确定性量（图1-1），借鉴结构工程可靠性理论方法，结合边坡工程的具体情况，用可靠指标或破坏概率（或可靠概率）描述边坡工程状态的理论体系。与传统的确定性理论比较，它能更好地反映边坡工程的实际状态，正确合理地解释许多用确定性理论无法解释的工程问题，因此引起国内外有关人士广泛关注。边坡工程随机分析之所以能够产生和发展并逐渐为广大工程技术人员所接受，是由于工程设计和分析中不可避免地要涉及到大量的不确定性因素，如岩体性质、荷载、破坏机理等。这些不确定性因素按其成因大致可以分为四大类：物理不确定性、统计不确定性、模型不确定性和人为过失造成的不确定性等。在具体的边坡工程分析中，可以概述如下：

一、岩层（土层）剖面与边界条件的不确定性

在边坡分析中，首先要知道边坡中包含的各岩层及其厚度变化等情况，从理论上讲，如果有足够多的测点或钻孔信息是可以精确地描述它们的。事实上，由于岩层出露条件和钻孔工作量的局限，人们是很难精确描述它们的，必然会加

入一些人为的判断因素,在有限个测点之间,进行主观推断,给出各岩层的边界。图1-2是某坝基C5构造剪切带17.0~40.0m段的厚度变化情况,可见同一剪切带的厚度变化是不规律的。岩层剖面和边界的不确定性必然导致破坏模式和计算模型等的不确定性。

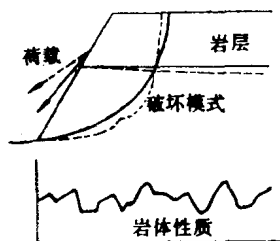


图 1-1 边坡工程的不确定性

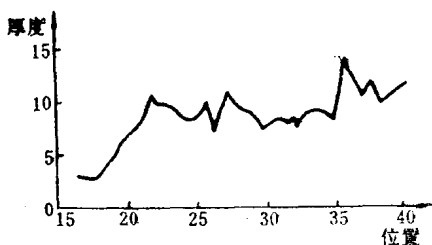


图 1-2 C5剪切带的厚度变化

二、岩土性质的固有变异性

岩体和土体都是非均质的各向异性体,各点间的性质往往有较大的差异,由于试验样品不足及其它各种因素的影响,其变化程度也表现出随机性,同一组试样在相同试验条件下

测定其强度，结果也表现出一定的离散性，其中摩擦角 ϕ 的值可能离散 $\pm 25\%$ ，粘聚力 C 值可能离散 $\pm 50\%$ ，给定正应力下的抗剪强度值变化约为 $\pm 30\%$ 。国内某露天煤矿北帮风化岩的抗剪切试验表明，粘聚力、内摩擦系数均服从正态分布，粘聚力 C 的变异系数（变异系数=标准差/均值）为 $0.18\sim 0.54$ ，内摩擦系数（ $\tan\phi$ ）的变异系数为 $0.19\sim 0.86$ 。人们在进行岩土性质的变异性研究时往往不注重取样的空间位置，只要是同一岩层的试样，对其试验结果进行笼统的统计分析，得出变异性的有关指标。事实上，由于岩土体是三维空间实体，在进行取样时，无法在精确的同一取样点获得多于一块的试样，只能在别的位置再获得试样，这样统计出的岩土性质变异性结果中，更大程度上包含有空间变异性的成分。因此，近年来人们引用了随机场、地质统计学和贝叶斯马尔可夫过程理论等研究岩土性质的空间变异性，并取得了一定进展。

三、试验样品数量不足

从理论上讲，岩层的边界和性质等并非完全是随机的，而是确实地存在于三维空间实体中的，而且至少在一定范围内这些性质和特征是相关的，可以用某些规律描述，如果进行无限多的勘察工作，情况是可以确知的。但是实践中，无论是地质工作还是试验工作都有限，而由少量的资料去推断全部情况是不可避免的，这样就不得不借助概率统计理论的工具。为方便起见，将岩层的性质和特征看作随机的，试验样品数量的影响程度也是不确定的，人们很难确知样品数量与真实试验结果之间的确切关系。

四、外加荷载大小和分布的不确定性

对矿山边坡工程来说，常见的外加荷载有地应力、地下

水、地震、爆破震动、运输等生产设备、降雨等，这些荷载很难用确定指标描述，它们都是随机变量，并且其分布的类型和特征参数往往又都具有不确定性。其它的边坡工程，如建筑物的基坑边坡、路基边坡及各类开挖边坡或自然边坡，同样也会遇到荷载的不确定性问题，并且荷载的不确定性往往又会导致岩土表现出的性质不确定性，如水理性质、动力性质等。

五、勘测取样方法与试验方法的误差

在取样及测试过程中对试件的扰动，试验环境条件以及试验方法的不一致等，都使结果产生差异。

六、计算模型的不确定性

边坡工程同其它岩土工程一样，在定量分析中边坡物理力学模型的建立，是以对岩土地质模型的深刻观察和分析为依据的。由于工程岩土的复杂性和人们分析判断能力的局限性及模拟条件和原型的差异，必然导致结果的不确定性，致使目前许多物理模拟试验结果仅能用来做机制分析或趋势分析，而难以为设计提供准确的依据。同时为了使量化计算能够实现，人们不得不对复杂的边坡破坏机理、模式及其环境条件等做出某些简化和假设，给出一些确切的函数关系，以此作为一切计算、分析和评价的基础。实际上，在简化和假设的过程中，已经引入了不确定性，因此不能说计算模型就是精确的，即使是输入相同的变量及其分布，由于采用不同的计算模型（当然是合理的），也会得出不同的结果。

为了说明上述各部分不确定性的大小，可举一土体边坡分析的例子。据Yucemen等人的研究，土体的天然变异系数为 $0.2 \sim 0.3$ （极限值为 $0.11 \sim 0.14$ ）；由于试样扰动、尺寸效应、剪切速率、各向异性、受力状态、渐进破坏等方面

的差别所引起的变异系数为0.24左右；由于试验数量不足引起的变异性与试验数量有关，它近似地等于空间变异性除以 $\sqrt{n}$ ， n 为试验样品数量。若试验样品数量在10到20之间，那么该项不确定性值约为0.05~0.1，这样土体性质总的变异系数约在0.3到0.35之间。此外，由于计算模型的不精确，圆弧法（瑞典）所引起的不确定性值约为0.1。

由于岩土工程中的不确定性，使人们对采用传统的确定性方法研究岩土边坡问题，即用安全系数表示安全程度产生了疑问。边坡安全系数是岩土许多参数的函数，既然这些参数具有不确定性，那么把安全系数作为确定值来判断边坡工程的安全程度显然是不够合理的。实际上，在岩土工程实例中，也确实出现过安全系数大于1的边坡却发生了破坏，而安全系数小于1的边坡却依然稳定的情况。为了最大限度地消除岩土工程中的不确定性，人们试图从提高岩土测试技术和计算技术的精确度入手，这种努力可以取得一定效果。然而，局部试验的精确性、确定性并不能消除岩土性状宏观判断的随机性和模糊性，靠无限度提高单项试验的精度、规模和完善确定性计算方法是不够的，因此用较简单的测试手段，对岩土进行大数量的信息采集，应用和发展随机理论、方法，以提高边坡工程状态客观判断的精度，就显得必要和有意义了。

在边坡及其它工程的设计和研究中，人们有意识或无意识地都考虑了岩土中不确定性因素的影响，例如在边坡临界安全系数的选取上，包含了对不确定性因素的预计。通常认为对于土坝，临界安全系数取1.25即可满足要求；对于煤渣堆或尾矿坝，或较复杂的基坑边坡，由于材料的特性可能变化无常，则临界安全系数一般取1.5。对于矿山而言，非运

输帮边坡的临界安全系数通常取为1.3, 运输帮边坡的通常取为1.5。从理论上讲, 如果能够充分认识和量化影响边坡稳定的因素, 对于任何边坡, 其临界安全系数都应取为1。可是由于无法真正地量化所有因素, 以及对输入参数和计算模型精确性的顾虑, 人们不得不凭借经验和工程实例的总结、推断, 将临界安全系数取为大于1的某个值, 具体取值要视对工程岩土的认识程度、环境条件及工程的重要性等而定。实际上临界安全系数的取值包含了对不确定性因素的直观预计。另一方面, 虽然安全系数是一个由确定性方法获得的一个确定数值, 但它本身又是一个不确定性量, 例如一个安全系数为1.4的边坡, 并不意味着有140%的安全程度, 安全系数为1.5的边坡, 也不说明它较安全系数为1.4的边坡要高10%的安全程度。这就是说, 安全系数大小的本身往往不能定量表示安全富裕的程度, 只能说明具有高安全系数的边坡要较低安全系数的边坡更稳定一些。

上述这些事实说明, 对于边坡及其它岩土工程的设计和分析, 单凭一个笼统的安全系数很难定量地评价工程的安全程度, 也无法比较采用不同的计算方法、取不同的安全系数时, 边坡工程是否具有相同的安全储备。随着现代科学技术的高速发展, 边坡工程已逐渐大型化和复杂化, 如人们经常会遇到高大、复杂和环境限制严格的露天矿边坡、铁路边坡、基坑边坡、坝体边坡、河谷岸坡等。为了客观地考虑到岩土工程中的不确定性因素和评价边坡工程的安全程度, 加之相关学科的发展和完善, 推动了随机分析方法和理论在岩土和边坡工程中的研究和应用, 目前也逐渐为广大工程技术人员及管理人员所接受。

第二节 边坡工程随机分析研究现状

边坡的随机分析是基于对岩土性质等的不确定性认识，随着认识逐步深化，随机研究（也称为可靠性研究）得以逐步发展。自60年代末以来，国际上对岩土不确定性的理论和应用研究以及边坡工程等的随机研究非常活跃，研究范围也相当广泛。原则上讲，岩土工程的随机分析方法可以应用于任何岩土工程问题，但由于各种因素的影响，目前比较常用的有以下几个方面：

- 1) 岩土工程结构物的设计和优化分析，尤其是边坡、挡土墙、海洋平台和桩基的稳定分析研究较多；
- 2) 岩土结构物的性状预测，如预测地基的孔隙水压和固结特性，沉降和水平位移特性等；
- 3) 地质勘探资料的统计分析、概率地质剖面的模拟和各种参数的概率分析及其表达、岩体节理的随机模拟等；
- 4) 各种数据和资料的检验、修正、补充和更新（update），其中除古典的分析方法以外，贝叶斯方法在近年得到了更广泛应用。

1971年在香港召开了第一届“统计学和概率论在土工结构中的应用国际会议”；1980年在澳大利亚召开了“概率方法在岩土工程中的应用学术讨论会”；1988年召开的“第六届岩土力学中的数值方法国际会议”，已将随机方法作为一个专门的内容讨论。1984年在加拿大多伦多召开的第四届和1988年在瑞士洛桑召开的第五届“国际滑坡会议”均由澳大利亚Wollongong大学的R.N.Chowdhury教授对过去几年来边坡工程可靠性研究的情况进行了系统的回顾与评价。其它的国际系列会议，如“岩石力学国际会议”、“土

力学与基础工程国际会议”、“露天采矿岩土稳定国际会议”、“美国岩石力学年会”以及国际上有关岩土和结构的著名杂志,如“国际岩石力学与采矿科学(International Journal of Rock Mechanics and Mining Science)”、“岩土工程学报(Journal of Geotechnical Engineering)”岩土力学(Geotechnique)、“

“加拿大岩土学报(Canadian Geotechnical Journal)”、“结构安全(Safety Structure)”等都经常发表一些有关岩土不确定性及边坡工程可靠性方面的文章。尤其是近几年来,有关边坡的文章中,很大一部分都是随机研究和应用方面的。这些文章中除了一些理论研究以外,工程实例研究也占有相当大的比重,这说明边坡工程随机性研究已开始运用到工程实践中。

近10年来,边坡工程的随机研究在国内发展迅速,涉及的范围也相当广泛,从山体边坡、坝体、铁路、土建到矿山边坡等许多领域。在露天矿边坡方面,1982年冶金部马鞍山矿山研究院负责完成的“攀钢石灰石矿边坡可靠性分析与经济评价”是可靠性理论方法在国内矿山边坡工程实践中的首次应用,1990年12月该院负责完成的“太钢尖山铁矿露天矿边坡优化设计方法”课题将当时的边坡可靠性理论和方法进行了比较全面的研究和应用。

边坡工程的可靠性研究可追溯到60年代末,在研究初期,认为岩土参数,如粘聚力,内摩擦角、容重等均是互不相关的随机变量,分布上多采用正态分布或对数正态分布,也有采用伽玛分布的。求解上多采用蒙特卡罗方法或中心点法。随着对岩土及边坡随机研究的深入,人们逐渐发现各岩土参数之间具有某种相关性。Nguyen(1985)指出:“许

多岩土参数的值都在不同程度上，以不同的方式受到同一过程的影响，因此任一对变量之间可能是正相关或负相关的，例如在渗流问题中，孔隙度与渗透性之间是正相关的，而粘聚力与内摩擦角之间是负相关的”。“粘聚力与内摩擦角之间的相关系数通常被假定是零，然而某些文献已经指出它们是负相关的（Chowdhury, 1986）”。在随机分析的方法上，目前广泛采用的仍然是蒙特卡罗随机模拟方法、中心点法、验算点法和概率矩点估计法（又称Rosenblueth）法。

以上概要地总结了近20年来边坡工程随机研究的工作和成果，这些工作对于建立边坡工程随机分析的基本理论、推动工程实践应用起到了积极作用。但是，客观地说边坡工程随机分析目前仍主要处于理论研究和实用探索阶段，没有建立一套设计和分析的规范，随机分析往往只作为确定性方法的一种补充和参考。有关随机分析结果的进一步处理和分析也缺少深入的研究，还没有达到广泛实用的阶段，这不仅仅是因为这种方法对大多数工程技术人员来说仍较生疏，不可能一下子被接受，问题还在于方法的本身也有许多不成熟的地方。比如，目前对岩土工程中种种不确定性的认识和研究仍显得不够，要定量地确定它们还有许多事情要做；又比如地质勘探工作中贯穿随机的概念和岩层资料分析中的随机处理也显得十分薄弱，有的甚至基本上还未涉及，如果缺少第一手资料的随机处理，那么边坡的随机分析就失去了必要的基础。因此，对岩层不确定性的认识、描述和工程实践是相当必要的，而且也是一项十分艰巨的工作。其次，目前的分析方法还比较复杂，影响了它的推广应用。复杂的方法可能会有较高的精度，但经济性和可接受的程度就会下降。尽管如