

# 岩土工程风险分析及应用综述

张贵金<sup>1</sup>, 徐卫亚<sup>2</sup>

(1. 长沙理工大学 河海工程学院, 长沙 410076; 2. 河海大学 岩土工程研究所, 南京 210098)

**摘要:** 系统分析了岩土工程不确定性的根源及其分析方法, 总结了降低不确定性的途径。系统评述了岩土参数随机场估计、随机变量描述方法以及模型不确定性研究。对几类典型岩土工程问题的风险分析方法、研究现状及其工程应用进行了总结。对目前岩土工程风险理论及其应用的前沿问题进行了研究和展望。研究指出岩土工程风险分析待研问题主要有: 系统的风险源辨识方法包括风险源辨识的可视化研究, 不确定性因子的合理描述研究, 极限状态包括失效模式的仿真研究, 不确定性计算包括应用信息融合技术数据挖掘技术研究, 目标可靠度研究, 风险转嫁风险交换的量化及风险跟踪的实施研究, 风险的反分析研究等。展望岩土工程风险分析与应用: 风险分析反映了对工程设计的综合性要求, 表现了安全与经济的统一; 定量风险分析作为决策工具或传统设计的补充, 可给决策者提供更多的辅助评价信息, 提高了结果的置信程度; 但现在能描述的还只是“随机性的确定性模式”, 工程师们只有使用“保守的”选择, 以适应和弥补不完全的认识与有限的资料的条件。

**关键词:** 岩土工程; 风险分析; 不确定性

**中图分类号:** TU 311; O 211

**文献标识码:** A

## Summary about risk analysis of geotechnical engineering and its application

ZHANG Gui-jin<sup>1</sup>, XU Wei-ya<sup>2</sup>

(1. Changsha University of Science and Technology, Changsha 410076, China; 2. Hohai University, Nanjing 210098, China)

**Abstract:** The inherent uncertainty on geotechnical engineering is rootstock come into being risk. The kinds of uncertainty have been systematic analysis. The ways for analysis and reducing uncertainty have been summarized. To evaluate stochastic-field about geotechnical parameters has been reviewed. The uncertainty of the numerical model and variables description has been discussed. The risk analysis ways, status in quo, and its application for typical geotechnical have been integrated. The forward question for geotechnical risk theory, such as reasonable description of uncertain factors, imitation study of invalidation modes, risk analysis applied modern information technology, to quantify research the weakened risk by engineering, and anti-analysis of risk as well as relative question has been viewed. The application prospect of geotechnical risk analysis, with regard to imaging synthesized demand for engineering design, representing the unification between safety and economy has been stated. By way of supplement of decision-making or traditional design, quantified risk analysis can provide more assistant evaluation information to the decision-maker. However, it can only be described of “random certainty model” at present, therefore, the engineer none but make conservative selection in order to adapt and remedy incomplete acquaintance and limited information in geotechnical engineering.

**Key words:** geotechnical engineering; risk analysis; uncertainty

### 1 引言

风险是指系统在规定的的时间和规定的条件下, 不能完成规定功能的概率, 风险可由经济损失等指标直接表达, 也可由失效概率(与可靠度对应)来间接描述。美国 Wisconsin 大学 James C. Hickman 教授认为风险的定义方式及其在决策过程中所起的作用因学科而异, 风险大小与一定的时间、空间条

件有关。风险分析试图认识所有不期望或异常的事件, 并评定每个事件出现的概率与后果。Enstein E. E. 认为风险分析反映了对工程设计的综合性要求, 表现了安全与经济的统一, 并可协调工程的近期投资和长远效益之间的矛盾。Duncan(2000 年)建议工程师依据风险估计结果进行设计。可靠度风险理论已在许多土木工程结构的设计规范中得到应用, 水利工程风险分析、风险决策分析已经是发达国家进

收稿日期: 2004-03-22

修改稿收到日期: 2004-07-30

资助项目: 教育部科学技术研究重点项目资助(No. 01099), 湖北省“十五”科技攻关项目资助(No.2002507430)

作者简介: 张贵金, 男, 1964 年生, 博士, 副教授, 主要从事岩土工程、水电工程风险方面的研究。E-mail: gjzhang98@yahoo.com.cn

行区域开发、流域规划、工程建设、社会保险的必要条件或重要手段。20世纪90年代末期，在洪华生等国际著名专家的推动下，美国和日本等国家已兴起考虑风险和效益的基于全概率分析思想的可靠度设计方法。

一切不确定性的因素是事物存在风险的根源。岩土工程的不确定性包括参数、模型不确定性和人们认识的不确定性，使得岩土工程基础及其上部的土木工程必然存在不同程度的风险。20世纪60年代可靠度风险理论被引入岩土工程领域以来，风险的概念很少给予量化，Casagrande著名的Terzaghi演讲(1965年)指出风险的完全定量计算不是很乐观<sup>[1]</sup>，但同时强调辨识不确定性并在设计中应予以重点考虑。从此，岩土工程中的不确定性研究已取得了实际的进展，不确定性概念、构造随机模型、采用可靠指标和破坏概率来评价岩土工程安全度逐渐被研究人员接受，在某些工程中还使用不确定性的数值和解析描述来辅助决策。在美国，风险分析已经被大坝设计委员会广泛接受，风险分析在香港、法国等地边坡稳定分析和评价中起着重要的决策作用。可以预见，定量风险必将成为各类工程决策的基础。

Ken Ho<sup>[2]</sup>等认为风险估计要以系统的、综合的方法考虑不确定性，要将定量估计(quantitative risk assessment, QRA)与定性估计相结合。Whitman<sup>[3]</sup>总结岩土工程中的风险管理涉及4方面的问题：概率能做什么？ 概率方法怎样用于岩土工程？

何时、什么类型的工程适于采用可靠度方法？更多的使用可靠度方法应做什么？什么能做？在岩土工程中，风险管理<sup>[4]</sup>包括以下5个步骤：

(1) 风险级别：鉴别风险的来源、特性与行为或现象有关的不确定性；

(2) 风险量化与度量：利用主客观的概率，评价产生错误的可能性；模拟风险源及其可能产生影响之间的关系，评价各种可能选择的的风险概率值；

(3) 风险评价：包括以上风险评价过程和风险管理之间的衔接；

(4) 风险决策：风险接受和规避。针对每一种决策的所有成本、效益和风险进行评估，包括成本核算、可能导致的潜在社会经济、环境或政治影响，以及风险的可接受程度；

(5) 风险管理：在(4)基础上，考虑可能存在的风险因素、进行风险的量化和估计，建立风险估算与评价模型，做出风险决策。

## 2 岩土工程风险分析的理论与实践

### 2.1 不确定性理论与风险源研究

岩体是不确定性系统，即实际岩土工程中存在固有的不确定性。一切不确定性因素成为岩土工程的风险源，故而岩土工程的风险源研究主要集中于其中的不确定性研究。

这种不确定性包括客观和主观不确定性，前者主要有荷载环境的初始应力场、介质地质环境的岩性参数、不同施工环境与条件等；后者主要由于对岩体变形破坏机理认识不清，导致对岩土力学分析和模拟不足，如计算模型、参数的选取、条件的假定、简化计算、信息描述、测量精度以及设计施工数据与信息。总体上涉及：随机性、模糊性、信息不完全性和信息处理的不确切性(孙钧, 1998年<sup>[5]</sup>)。这些不确定性正是受体的风险源。

不确定性反映在时间和空间上，时间不确定性用随机过程描述，空间不确定性可用随机场描述。如果一个基本变量的不确定性对极限状态有较大影响，就应视为不确定性变量来考虑。不确定性在岩土工程中是普遍存在的，在工程的所有阶段，工程师们都会遇到不确定性：如选址差或地质包含未显露出的弱点；场地材料特性调查不充分；需确定的参数值(强度，渗透性)不清；分析得到的重要数值的准确性(如安全系数)等因素，这此因素影响设计的安全性。在很多情况下，含有不确定性因素的设计是在实际施工时才完成的。因此，在进行岩石力学与工程问题的研究、设计、施工和工程处理活动中进行风险分析非常必要，且意义重大。

#### 2.1.1 产生不确定性因素的原因

岩土体的不确定性源于其固有非均质、有限的可利用信息以及量测误差，其中地质因素是产生不确定性的主要原因。岩土力学行为及其空间分布太复杂以致难以模拟，只能采取简化的方式。一方面，地质结构模型辨识是基于贡献因子的特征、有关环境组合，如弱化变形和高渗压等，进而在模型中定义潜在灾害，潜在的严重地质问题可能仅依赖于少数几个贡献因素，应辨识这种潜在因素可能导致的灾害，在计算设计时使用合适的地质特征。另一方面，岩土工程施工技术及工程行为要求向量化特性转化，即对不可预见的工程敏感因素要进行量化。

因此，岩土工程不确定的基本原因有<sup>[6]</sup>：(1) 由于地下特征未被辨识，而不同于假定的情形；(2) 辨识的地下特征普遍不服从定量意义上的结果；(3) 涉及的各部分可能存在贯通破坏。

### 2.1.2 模型的不确定性

有目的地简化和机理不清导致计算模型的不确定性,包括物理和数学模型两种。物理模型一般可采用概化模型和相等模型描述。

如采用概化模型,其合理性首先要用地质成因分析来论证,而后还要用统计准则来证实。例如:在研究和概化渗透空间不均匀性时,应根据其形成的地质成因条件和处理工程问题的比例尺进行。当原始信息不足时,部分地带的参数只能根据模拟选取,这样便把不确定性带进了模型,用反分析法也不一定能消除这种不确定性。

如采用相等模型,要再现研究区地质结构和水文地质条件的总体特点,在工程模型中,对某些因素甚至是一些重要因素可忽略不计,例如将岩溶管道,溶蚀裂隙概化为裂隙岩体,在其周围单元以一个大的渗透系数等价代之,而不影响总体渗流场。

在水文地质中,由于不确定性因素经常不具备采用统计概率评价所需要的定量特征,在运用统计模型进行预测包括风险分析时显然会产生误差。概化的置信度和已建模型的可靠性,可通过因素-方差分析法取得,加维奇<sup>[6]</sup>对曼格什拉克自流盆地水源地进行水文地质概化,模型平均相对误差达6%~10%。必须评价由于没有考虑或简化了若干水文地质因素所产生的误差,并评价这些因素对工程的影响程度。模型可引来多大的误差值?在哪个阶段出现误差,误差如何产生的?怎样确定误差,能否减少这类误差?如何才能减少误差?概化对预测问题的方案有何影响?这些问题仍是不清楚的。模拟结果同工程处理一样,应对模拟结果的精度和置信度进行定量评价,而定量地表现置信度是极其复杂的,只能基于勘测所获资料通过解析计算、统计处理和模拟等方式进行分析。

### 2.1.3 描述不确定性的方法

真值的不确定性可用随机变量的均值、变异系数及概率分布函数描述。描述不确定性最直观的指标就是变异性,研究表明,变量的变异性是影响风险的最重要因素。变量的变异特征可用方差、变异系数综合表达。其中方差或称离散度,是变量与均值间的关系,是一个绝对变化值,说明变量的波动状态,从而揭示变量差异性的物理特征;而变异系数是一个相对数,是描述变量变化程度的十分有力的指标。如果变异系数不大,则可不作为随机变量。

#### (1) 数学模型的不确定性描述

在岩土工程可靠性风险分析时,计算模型常充

当极限状态函数,所以模型不确定性的计算和分析在可靠度风险分析中相当重要,同时也是模型校准的一条有效途径。基本方法为<sup>[7]</sup>:

$$P_0 = BP_u \quad (1)$$

式中  $B$  为模型不确定性系数,可作为一个随机变量来处理,  $P_u$  为模型预测值,  $P_0$  为真实值,可通过试验值近似代替,尽管实验也有误差,但实验误差,尤其是原位试验误差较之模型的不确定性来说要小得多。因而,  $B$  的统计特性可通过实测值同模型预测值的对比分析推得。进行  $n$  次试验,  $B = P_0 / P_u$ 。若  $B$  的样本少,要考虑统计不确定性。保守的模型应是均值  $\mu_B > 1$ ,若  $\mu_B < 1$ ,则说明所用计算模型是不安全的,可用  $B$  的统计均值来修正。方差  $\sigma_B$  越大,表明  $B$  的离散程度大,计算模型可靠性差。

#### (2) 岩土参数空间变异性描述

正是由于确定变异的重要性,国内外学者对此进行了大量的研究。研究空间变异表明,对于地质岩体少样本的情况,适合的空间变异模型有基于随机场的分析模型和地质统计模型两种<sup>[8,9]</sup>,描述岩土体参数随机场的随机性有两种理论方法:半变异和相关函数。半变异函数是 Matheron、Krigé 提出的一种地质统计分析理论,用变异函数研究随机变量的空间分布特性,结果表明距离增加,变异性也增加。相关函数理论是 Vanmarcke<sup>[10]</sup>提出的随机场模型,描述了距离与相关性的反比关系。

随机场中的参数偏离各自趋势量的大小、空间方差分别用协方差函数和变异函数描述。空间总体方差数据围绕趋势做上下波动的规律与某点的位置无关,它是变异函数和协方差函数的和函数<sup>[11]</sup>。在无偏性约束条件下寻求最小估计方差,张征、李守巨等<sup>[12]</sup>进行了深入研究,并提出最优估计模型,即泛克立格方法。处理空间数据呈现高度变异问题可用小波分析残余克里格方法<sup>[13]</sup>。但总体来看,这种量化局限于区域化变量具有连续性的情形,且变程不能太长。

至于相关函数方法:确定性分析中使用的岩土参数是通过试验统计分析得到的,这些参数的均值和方差称为“点特性”。而岩土工程的特性多取决于相应范围内的空间平均值,这种岩土参数空间平均值的变异性才是工程最需关注的,也是可靠度风险分析中需量化计算的指标。若仅用点变异来分析计算,则夸大了岩土性质的变异,即估计的风险偏大。依据粘聚力的影响,文献[14]分析不排水抗剪强度

随深度的空间变异，表明在可靠度分析中若不考虑变量的相关距离，估计的失效概率可能偏于保守。从现有的研究情况看，表示岩土体参数空间变异较好的方法是 Vanmarcke 提出的描述岩土体空间自相关特性的随机场模型，用方差折减系数把“点变异性”和空间变异性联系在一起，而方差折减系数则取决于岩土性质的相关距离或相关范围。黄广龙<sup>[15]</sup>推导了反映岩土性质空间变异性的方差折减系数的表达式，并在其博士论文中对此问题进行了系统的阐述。但在某些情形下，比如考察溶蚀岩体的渗透性时，相关距离难以确定，也就不能简单用方差折减系数来表达。文献[16]总结了岩体变异特征量化的方法（图 1），基于地质上对于灌浆平洞溶蚀岩体的空间结构分析，提出一种基于“3σ 法则”的误差传播函数法描述溶蚀岩体渗透性的变异特征，在有限元渗流风险计算时给各单元赋予不同的变异，可以反映帷幕体附近的真实水文地质背景。

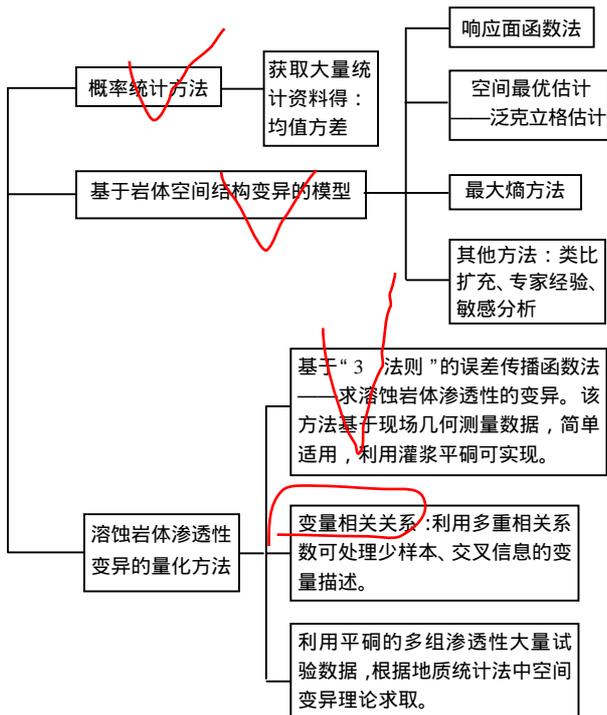


图 1 岩体变异特征量化的方法<sup>[13]</sup>

Fig.1 The method to measure the spacial variance of the rock mass

(3) 应用数学方法描述不确定性的局限

描述不确定性的客观方法主要使用古典频率统计方法，这无疑会受以下因素的影响。

随机模糊特性：由于工程地质中对岩组划分的模糊性及取样测试带来的随机性等原因，使得岩土力学参数的不确定性同时包括随机性和模糊性，是一随机模糊变量。黄志全<sup>[17]</sup>、李胡生<sup>[18]</sup>、熊文林<sup>[19]</sup>

等对此进行了系列研究。文献[19]给出了岩体力学参数随机模糊概率分布模型。文献[20]认为安全系数也具有随机模糊性。文献[21, 22]视矿山开采引起的岩体移动和变形这一事件为模糊事件，将此方法应用于露天矿山边坡失稳分析，得出了一些有益的结论。但难以确定合适的模糊概率模型及其参数。

统计特性的影响 岩土介质参数如抗剪强度的不确定性，表现为参数的自相关性、参数之间的互相关性和极强的随机性。这些特性均对岩土介质的强度和岩土工程可靠度产生重大影响。严春风等<sup>[23]</sup>分析 Mohr-Coulomb 强度准则，强度参数  $c, \phi$  的分布概型对可靠度指标  $\beta$  的敏感度问题，有如下结论：在极限状态方程中分布函数概型对可靠度的影响最大。当随机变量  $c, \phi$  服从极值型和 Weibull 分布时，将非正态分布随机变量简化成正态随机变量带来的误差，达 20% ~ 30%。通常的概率分布函数为正态分布和对数正态分布，后者不能取负值。尽管其他概率分布如  $\beta$  分布更精细，因其计算复杂而少有应用。

数据量的限制：在理论上，决定分布函数需超过 40 个数据点，然而多数岩土工程中，要做这种信息收集和不确定性辨识是不可能的。但对岩体存在的破坏特征和功能影响，可利用有些基于经验的指标（如边坡表面变形）与功能概率（边坡破坏概率）之间的主观关系，估计不确定性可靠度，如破坏存在的概率等<sup>[3]</sup>。对于边坡工程，基于几何形状、剪力强度和孔隙压力的不确定性，边坡破坏的概率主要考虑是否存在倾斜弱层的可能性。Fell（1994 年）用大量的例子评述滑坡概率的估计方法，计算与降雨有关的滑坡风险，研究了允许风险问题。这虽然是一种主观的近似处理方法，但也是最好的方法。很多实际情况必须采用多种手段弥补信息的不足，如利用同类相似工程或文献资料类比扩充母体样本容量，以及专家经验方法等<sup>[24]</sup>，参用其他相似条件下的同类工程确定变异系数<sup>[25]</sup>。确定性分析所用到的参数实际上相当于随机参数的均值，显然，如果统计信息少到连均值都无法得出，那么确定性分析也将无法进行。

2.1.3 控制不确定性的途径

对于岩土工程不确定性的控制，最要紧的是合适的态度，因为在最好的控制环境下不确定性还是存在的。目标是试图辨识和类分不确定因素的本质和原因<sup>[4]</sup>，具体途径有：

- (1) 修正功能模型及其变量，获得更新的功能

概率；

(2) 修正相应的后果和功能形式，如避免滚石落到路面而建保护平台，以降低路破坏的概率；

(3) 充分利用附加信息修正 如试验反映出与原假定不同的摩擦角分布；

(4) 上述各方面可通过直接修正参数或使用似然函数而作预后验分析进行。包括修改有关参数的不确定性，在有附加信息时，似然函数表达勘探或试验程序的内在不确定性。如对边坡削平或施加维护结构，似然函数则表达施工改变型式后的作用的不确定性<sup>[3]</sup>。

(5) 施工前已对不确定性和风险定量计算，辨识地质条件，施工过程中则利用获得的最新信息修正风险估计，反过来指导施工决策，修改设计和施工是最好的方式(Morgenstern, 1995年)。

### 3 典型岩土工程风险分析的特点与方法

#### 3.1 边坡及地基工程可靠度风险分析

边坡可靠性分析是基于极限平衡原理建立状态方程，通过安全系数或安全储备与基本变量  $X_i (i=1, 2, \dots, n)$  的函数关系和它们呈现的统计规律求得可靠度。祝玉学<sup>[26]</sup>在前人研究的基础上，系统地研究了边坡可靠性分析基本原理、方法。

##### (1) 边坡真实破坏的可靠度分析

边坡破坏是一种渐进性破坏，边坡滑动面上各点的破坏概率是不相同的，应据此建立相应的数学模型。理论上：边坡初始局部破坏首先产生于滑动面上局部破坏概率最大的条分，然后向渐进破坏概率较大的一侧扩展（或破坏停止），对于已破坏的条分，其强度为残余强度值，其剩余剪力由未破坏条分承担，当破坏扩展到一定阶段时，边坡就会产生整体破坏。判断初始破坏是否产生以及破坏是否继续扩展需要给出适当的概率阈值（即可接受的风险水平阈值），阈值选取应参考国内外同类工程，并结合具体情况予以考虑。杨庆等<sup>[27]</sup>提出了这一思路，但未给出整体边坡的风险算法，且随着条分的增加，条件概率的计算是很复杂的，尤其是三维的情形，相对不同条分的概率阈值如何确定也有待研究。

##### (2) 边坡极限状态的描述

边坡破坏的机理可能相似，但破坏的判据量值又各不相同，需专门研究。各类岩土体对各种类型的移动和变形都有相应的承受范围，若超过这一范围就可能发生破坏。例如，深基坑开挖后，边坡土

体及开挖边界以外的地表将引起不同程度的移动和变形。文献[28]认为  $\varepsilon_{\min} = 6 \text{ mm/m}$  是岩土体破坏的判据，拉伸应变为  $6 \text{ mm/m}$  的等值线就可认为是边坡的滑移线，拉伸应变  $\varepsilon_{\min} = 6 \text{ mm/m}$  的部分土体即为滑坡体。王保田<sup>[29]</sup>分析了岩土参数空间变异性的实质和各随机变量统计方法，即不连续面上几何、力学指标变异性的来源和统计方法，给出了关键块体判别极限状态方程组和可靠性分析的基本公式，并应用于三峡船闸边坡稳定分析中。

另外，岩质边坡存在流变特性，显然这种流变存在不确定性。这一类的风险研究还未见报道。

#### 3.2 裂隙岩体的随机渗流及多场耦合的风险问题

国内外学者对各向异性、具有随机性特点的裂隙介质渗流问题，做了大量的研究。尽管有些研究还缺乏具体的工程实践意义，但对随机渗流的研究已越来越具体。文献[30]对地层渗漏的随机分析表明，由于渗透层的存在，水头变异和方差急剧减小，水头相关距离也呈同样的变化。文献[31]综合应用随机场模拟、渗流、边坡稳定分析，研究随机渗透系数对土坝边坡稳定的影响。按空间稳定随机场，渗透系数服从对数正态分布，域内饱和渗透系数的空间变异用 Turning Band 方法产生。文献[32]研究渗透系数的变异导致下游边坡上的孔隙水压力以及边坡可靠指标的变化情况。渗透特性决定孔隙水压力（其不确定性会导致预测有效应力的不确定性）和饱和度，二者又极强地影响抗剪强度。目前，渗透系数变异对安全系数和可靠指标的影响还未弄清。

文献[33]建立了地下水流方程的随机公式，但未考虑耦合作用。由于多数岩土工程处于渗流应力耦合场，有时还处在化学、温度场等多场耦合的赋存环境，这种耦合作用的不确定性形成了完整的风险源。文献[34]对二维渗流应力耦合场的随机性做了初步探讨。目前，考虑耦合作用的风险分析还有很多困难，诸如耦合机理及模型本身的研究、耦合风险分析理论、参数变异的影响规律等等。

#### 3.3 地下工程的风险

地下工程中的不确定性、模糊性制约了人们对地下工程变形破坏特性的准确认识和稳定性的可靠性预报。从参数反演、模型识别到新的本构模型的提出，都在力图提高地下工程数值分析结果的可靠性<sup>[35]</sup>。

Box 和 Wilson (1951年) 最早提出了响应面函数<sup>[36]</sup>，通过数值分析，建立结构响应  $y$  和这个结构模型参数  $x_1, x_2, \dots, x_n$  之间的关系。通过有限次

的数值计算,可获得结构响应 $y$ 和模型参数 $x_1, x_2, \dots, x_n$ 的一组样本。借助于数据拟合,确定分析模型中的待定参数和显示函数。颜立新<sup>[37]</sup>应用该法对金川公司龙首矿1280 m竖井卷扬机硐室的稳定性进行了可靠度分析。Zhou J.<sup>[38]</sup>利用有限元研究岩土工程固有的非均质特性,求解一个理想隧道开挖问题的可靠度。利用有限元节点信息为功能函数确定输入参数,计算洞室围岩锚固与不锚情形下的破坏概率,可估计不同支护措施的风险趋势。文献[39~42]在这方面做了一些应用研究,但对不确定性的考虑都还不完全,更复杂的真实例子还不能考虑。事实上,在定量分析难以定量应用的今天,工程类比与专家经验在地下工程中仍具有重要作用<sup>[43]</sup>。

#### 4 岩土工程基于风险的设计

岩土工程问题设计方法可分为两大类:(1) 依赖规范、规则、公认的惯例设计的多数常规工程;(2) 研究长期运行的潜在风险,以不可能完全消除风险、以较高造价降低风险达到可忽略的水平为特征。运用可靠性分析原理进行风险分析,其目标是使可能达到极限状态的概率足够小,将工程风险限制在可接受的范围内。岩土工程风险分析的应用,就是对实际工程进行概率极限状态设计,在此基础上进行风险决策。

目前,只有大型工程、建筑和公用设施按此方法进行了设计。可靠性设计除《桩基础规范》外尚未在岩土工程领域得到普遍应用。GB 50021-94 岩土工程勘察规范在极限状态与概率法的问题上,只作了一些原则的规定。如第1214条规定:“岩土工程的定量分析可采用定值法,对特殊工程,需要时可辅以概率法进行综合评价”,第1215条规定:在勘察成果报告中,应按不同情况提供岩土参数值<sup>[44]</sup>。

由于岩土工程自身的特点,不能将现有的较为成熟的上部结构可靠性分析方法不加区别地、简单地移植过来,必须对岩土体的赋存环境及其所受动、静载作用效应进行研究,分析岩土体的物理力学特性,正确运用概率论、统计学、模糊数学、信息熵等理论方法,进行不确定性描述,提出正确的概念与方法。失效概率通过对设计变量相联系的不确定性进行系统分析来求得,风险分析的步骤有:(1) 收集信息,确立不确定性因素;(2) 模拟功能和结果,包括估计不确定性的风险;(3) 收集附加信息,修正参数,在此基础上做方案选择决策。这使得设计方法更为复杂,但设计更为经济<sup>[38]</sup>。

当然,在岩土工程中,概率方法不能替代传统方法,它作为一种工具,只是有效地补充传统方法。大量的设计会由工程师和业主讨论直到业主(或认知保险公司)在造价和风险之间寻求一个可接受的平衡,这才是真正意义上的优化设计。比如,边坡优化设计断面的综合影响因素包括:岩土体强度指标、工程的重要程度、建设区经济发展指标等。地基条件对土木工程反映敏感,NMH Allalaby<sup>[45]</sup>研究了建筑工程中地基风险对工程费用的影响,经济指标衡量的场地效益可用风险模拟加以描述。文献[46,47]利用施工实例模拟地基条件对工程成本和工期的影响。

#### 5 岩土工程风险分析待研究的问题

岩土工程风险分析的工程应用,包括优化设计和风险决策具有极大的实践价值。但由于岩土工程本身的不确定性特点,其风险分析面临更复杂的挑战。就目前认识,以下课题有待深入研究:

(1) 实际应用方面最根本的问题是对不确定性因子的合理描述。对风险源的辨识,直接影响进入模型的风险因素选取、风险因子之间的相关性确定,岩土工程还只能根据专家经验作一些定性的研究。如何结合工程背景、有限样本、风险理论建立一套系统的风险辨识方法,以及风险源辨识的可视化研究,具有重要的研究意义。

(2) 实际工程很难清楚确定工程的临界情形,目前能做到的定量风险估计是基于人为假定的系统失事。岩土工程多处于多场耦合作用的赋存环境,对复杂系统,状态变量众多且特性各异,极限状态方程往往是非线性的,为了建立合理的功能函数,需进行失效模式的仿真研究以弄清失效机理,并研究适于材料非线性、动力系统的随机有限元算法。

(3) 应用现代信息技术进行风险分析,在可靠性评估中应用信息融合技术<sup>[48,49]</sup>,以及数据挖掘技术。数据挖掘基于粗糙集理论,不需要预先给定某些特征或属性的数量描述,如统计学中的概率分布、模糊理论中的隶属度或隶属函数等,而是直接从给定问题的描述集合出发,通过不可分辨关系和不可分辨类确定给定问题的近似域,从而找出该问题中的内在规律<sup>[50~54]</sup>。粗糙集理论同模糊集、神经网络、证据理论一起,成为不确定性计算的一个重要分支。将数据挖掘技术应用于对风险源的识别、风险参数的确定、失效模式的判断、功能函数的建立等方面,需进行适用性研究。

(4) 目标可靠度确定、标准规范的研究:理论上应根据结构的重要性、失效后果、破坏性质、经济指标等因素以优化的方法分析确定。但限于统计资料的稀少,现有的“校准法”(对现行结构设计规范的反演分析,得到现有结构设计总体的可靠度水准,即为今后设计的目标可靠度<sup>[55]</sup>)实质上认为现行设计规范的可靠度水准在总体上是合理的。

(5) 风险转嫁(减弱)的量化研究,实际工程中是通过工程处理措施来降低风险,实现风险交换(转嫁)的。评价各种风险交换,提出工程风险交换(转嫁)的概念, Borch 给出 Pareto 最优风险交换这一特征<sup>[56]</sup>。实际工程中如何通过工程处理等措施实现风险交换(转嫁),如何定量评价降低风险措施的效果,风险交换的量化计算,风险跟踪的实施等都是具有挑战性的问题和富于开创性的课题。

(6) 风险的反分析,这包括两方面的内容:一是可靠度,即破坏概率的误差和可信度,这是工程决策中所极为关注的指标;二是根据设计允许的风险反求某些变量的均值或其变异范围,通过对观测数据的分析来指导降低风险措施的实施。

## 6 岩土工程风险分析与应用展望

尽管人们对风险分析的应用存在多种的疑虑或偏见,但长期以来,对于岩土工程这样的不确定性因素较多、量测实验数据有限、模型误差大的介质,工程师的认识依然是从概率现象入手的,研究的结果和评价也须以概率的形式表达。实践证明,利用各种不确定性研究方法,使用定量风险分析作为决策工具或传统设计的补充,在相当程度上可给决策者提供更多的辅助评价信息。

风险分析试图认识所有不期望或异常的事件,并评定每个出现事件的概率与后果。完整的风险分析是根据各种自然现象的概率及其对相关的自然和人类——即工程系统的可能响应进行全面的估计,对造价以及各种社会、经济和环境方面的灾害性结果进行评估。风险分析反映了对工程设计的综合性要求,表现了安全与经济的统一,并可协调工程的近期投资和长远效益之间的矛盾。风险分析的结果包括破坏路径和相关可能性,整体破坏的概率,以及安全和造价的平衡。

在风险分析中,概率方法的优点是能分析材料参数的变异性和其他方面的不确定性,其计算结果提高了置信程度。但并不是用一个“破坏概率”代替“安全系数”,问题本身就完全解决了。应当指出,对边坡稳定、结构动力稳定性、大坝破坏、洪水演

算、渗透等的确定性分析结果是综合风险评估方法的重要基础。应将风险分析与确定性分析结合考虑,共同作为决策依据。Duncan 认为:“失效概率不能看成安全系数的替代品,而是一种补充。同时计算安全系数和失效概率比单独计算任何一个要好。虽然我们还不能准确计算安全系数和失效概率,但是两者互补可大大提高成果的精度。”

事实上,我们关注的“总体”、“分布”等概念在真实世界中,只是形式上的,并不存在固定的原型。从观测的资料中获得实测的经验模型,把模型观测到的事实与模型的物理原理联系起来得到成因模型。随机模型既不是经验的,也不是成因的,而是实用主义的,它完全受一种用简单概率算法处理变量峰值的硬性规定所左右,认为求出的结果具有需要的概率意义。但决策所需要的又正是这些不可避免的环境背景为基础的可靠性分析,且关心的与可靠性有关的问题往往是不能定量回答的。V. Klemes (1985 年)认为现在能描述的还只是“随机性的确定性模式”,许多数学公式从一些近乎有理但带有任意的假设出发,而得出精密叙述但不适当的结论。因此,在工程实践上,工程师只有使用“保守的”选择,以适应和弥补不完全的认识与有限的资料的条件。

## 参 考 文 献

- [1] Muir Wood A M. Control of Uncertainty in Geotechnical Engineering[A]. *Geotechnical engineering emerging trends in design and practice*[C]. Rotterdam: Balkema A A, 1994. 155 - 176.
- [2] Ken Ho, Eric Leroi Bill Roberds. Quantitative risk assessment: Application, myths and future direction[A]. *Modern Techniques for Dams Financing, Construction, Operation, Risk Assessment*[C]. Dresden: [s. n.], 2001. 269 - 305.
- [3] Robert Whitman V. Organizing and evaluating uncertainty in geotechnical engineering[J]. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 2000, (7): 583 - 593.
- [4] Einstein H H. Risk and risk analysis in rock engineering[J]. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 1996, (4): 141 - 155.
- [5] 孙钧, 蒋树屏, 袁勇. 岩土力学反演问题的随机理论与方法[M]. 汕头: 汕头出版社, 1996. 1 - 5.
- [6] 加维奇[苏]. 水文地质学中应用模拟的理论与实践[M]. 杨守廉译. 北京: 地质出版社, 1987.
- [7] 冷伍明. 基础工程可靠度分析与设计理论[M]. 长沙: 中南大学出版社, 2000.
- [8] 陈祖煜. 土质边坡稳定分析——原理、方法、程序[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2003. 306 - 315.
- [9] Sivakumar Babu G L, Mukesh M D. Characterization of

- soil spatial variability and its influence on slope stability[J]. **India Geotechnical Journal**, 2002, 32(2): 123 - 142.
- [10] Vanmarcke E. Reliability of Earth Slopes[J]. **Journal of Geotechnical Engineering, ARCE**, 1977, 103(11): 1 247 - 1 265.
- [11] 刘春原, 阎澍旺. 岩土参数随机场特性及线性预测[J]. **岩土工程学报**, 2002, 24(5): 588 - 591.  
LIU Chun-yuan, YAN Shu-wang. Characteristic of the random field of geotechnical parameters and linear prediction[J]. **Chinese Journal of Geotechnical Engineering**, 2002, 24(5): 588 - 591.
- [12] 李守巨, 刘迎曦, 王登刚. 混凝土重力坝弹性参数识别的灵敏度分析及实例[J]. **岩土工程学报**, 2000, 22(3): 381 - 383.  
LI Shou-ju, LIU Yin-xi, WANG Deng-gao. Sensitivity analysis and example of elastic parameters identification for concrete gravity dam[J]. **Chinese Journal of Geotechnical Engineering**, 2000, 22(3): 381 - 383.
- [13] Demyanov V, Soltani S, Kanevaki M, et al. Wavelet analysis residual kriging vs. neural network residual kriging[A]. **Modern Techniques for Dams Financing, Construction, Operation, Risk Assessment**[C]. Dresden: [s. n.], 2001. 18 - 30.
- [14] Sivakumar G L Babu, Mukesh M D. Characterization of soil spatial variability and its influence on slope stability[J]. **India Geotechnical Journal**, 2002, 32(2): 123 - 142.
- [15] 黄广龙, 龚晓南, 肖溟. 土性参数的随机场模型及桩体沉降变异特性分析[J]. **岩土力学**, 2000, 21(4): 311 - 315.  
HUANG Guang-long, GONG Xiao-nan, XIAO Ming. Random field model of soil property and analysis of variability of pile-settlement[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2000, 21(4): 311 - 315.
- [16] 张贵金. 岩溶地区重大水电工程防渗帷幕的风险研究[D]. 南京: 河海大学, 2003.
- [17] 黄志全, 王思敬, 李华晔. 岩体力学参数取值的置信度及其可靠性[J]. **岩石力学与工程学报**, 1999, 18(1): 33 - 35.  
HUANG Zhi-quan, WANG Si-jing, LI Hua-ye. The believable degree of mechanical parameters of rock mass and its reliability[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 1999, 18(1): 33 - 35.
- [18] 李胡生, 熊文林. 岩石力学参数概率分布的随机-模糊估计方法[J]. **固体力学学报**, 1993, 57(4): 23 - 26.  
LI Hu-sheng, XIONG Wen-lin. A random-fuzzy for estimating the probability distribution of rock mechanics parameters[J]. **Acta Mechanica Solid Sinica**, 1993, 57(4): 23 - 26.
- [19] 熊文林, 李胡生. 岩石样本力学参数值的随机模糊处理方法[J]. **岩土工程学报**, 1992, 57(6): 12 - 15.  
XIONG Wen-lin, LI Hu-sheng. A random-fuzzy method for treating the experimental data of mechanics parameters of rock sample[J]. **Chinese Journal of Geotechnical Engineering**, 1992, 57(6): 12 - 15.
- [20] 柴贺军, 黄润秋. 粘性土边坡破坏的随机模糊可靠度分析模型[J]. **水文地质工程地质**, 1988, (3): 35 - 38.  
CHAI He-jun, HUANG Run-qiu. Random-fuzzy probability model on destroy of clay slope[J]. **Hydrogeologic and Engineering Geology**, 1988, (3): 35 - 38.
- [21] 李文秀. 岩体移动的 Fuzzy 概率分析[J]. **中国科学(B 辑)**, 1986, (9): 971 - 980.  
LI Wen-xiu. Fuzzy probability analysis of rock mass movement[J]. **Chinese Science (B Series)**, 1986, (9): 971 - 980.
- [22] 李文秀. 露天矿山边坡失稳的模糊(Fuzzy)概率问题[J]. **土木工程学报**, 1988, (8): 81 - 88.  
LI Wen-xiu. Fuzzy probability question of slope instability of opencast mine[J]. **Chinese Journal of Civil Engineering**, 1988, (8): 81 - 88.
- [23] 严春风, 刘东燕, 张建辉, 等. 岩土工程可靠度关于强度参数分布函数模型的敏感度分析[J]. **岩石力学与工程学报**, 1999, 18(1): 36 - 39.  
YAN Chun-feng, LIU Dong-yan, ZHANG Jian-hui, et al. The Susceptibility analysis of reliability for probability distribution types of parameters in strength criterion[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 1999, 18(1): 36 - 39.
- [24] Küpel H J. 评价岩石水力参数的原位变形测量[A]. 第30届国际地质大会论文集[C]. 北京: 地质出版社, 1999, 270 - 279.
- [25] Turner R, Schw Eiger H F. Reliability analysis for geotechnical problems via finite elements- a practical application[A]. **Extended Abstracts International Conference on Geotechnical and Geological Engineering**[C]. Australia, Melbourne, 2000.11: 1 - 6.
- [26] 祝玉学. 边坡可靠性分析[M]. 北京: 冶金工业出版社, 1993.
- [27] 杨庆, 焦健奎, 栾茂田. 边坡可靠性与经济风险性分析及其应用[J]. **工程地质学报**, 2000, 8(1): 86 - 90.  
YAN Qing, JIAO Jian-kui, LUAN Mao-tian. Reliability analysis and risk evaluation of the slope engineering[J]. **Journal of Engineering Geology**, 2000, 8(1): 86 - 90.
- [28] 朱文彬, 张家生, 刘宝琛. 随机介质理论在深基坑稳定性分析中的应用[J]. **岩土力学**, 1998, 19(2): 14 - 18.  
ZHU Wen-bin, ZHANG Jia-sheng, LIU Bao-chen. Application of stochastic medium theory to investigation of stability of foundation pit[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 1998, 19(2): 14 - 18.
- [29] 王保田. 边坡稳定可靠性分析[D]. 南京: 河海大学, 1992.
- [30] Gomez-Hernandez J J, Hedricks Franssen H J, Cassiraga E F. Stochastic analysis of flow response in a three-dimensional fractured rock mass block[J]. **International Journal of Rock Mechanics & Mining Science**, 2001, 38: 31 - 44.
- [31] Kobayashi A, Fujita T, Chijimatsu M. Continuous approach of coupled mechanical and hydraulic behavior of a fractured rock mass during hypothetical shaft sinking

- at sellafield, UK[J]. **International Journal of Rock Mechanics & Mining Science**, 2001, 38: 45 - 57.
- [32] GUI Sheng-xiang, ZHANG Ren-duo, John P Turner, et al. Probabilistic slope stability analysis with stochastic soil hydraulic conductivity[J]. **Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering**, 2000, 1: 1 - 4.
- [33] Zhu J, Satis M G. Stochastic analysis of groundwater flow in aquifers with leakage[A]. **Modern Techniques for Dams Financing, Construction, Operation, Risk Assessment**[C]. Dresden: [s. n.], 2001. 228 - 242.
- [34] 朱军, 陆述远. 平面随机渗流场理论初探[J]. 武汉水利电力大学学报, 1999, 32(5): 16 - 18.  
ZHU Jun, LU Shu-yuan. Research on theory of 2-D random seepage field[J]. **Journal of Wuhan University of Hydraulic & electric Engineering**, 1999, 32(5): 16 - 18.
- [35] 王兵, 谢锦昌. 偏压隧道模型试验及可靠度分析[J]. 工程力学 .1998, 15(1): 85 - 92.  
WANG Bing, XIE Jing-chang. Model test and probability analysis for an unsymmetrically loaded tunnel[J]. **Engineering Mechanics**, 1998, 15(1): 85 - 92.
- [36] 颜立新, 康红普, 高谦. 基于响应面函数的可靠度分析及其应用[J]. 岩土力学, 2001, 22(3): 327 - 330.  
YAN li-xin, KANG Hong-pu, GAO Qian. Reliability analysis based on response surface function and its application in a chamber[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2001, 22(3): 327 - 330.
- [37] Einstein H, Chiaverio F, Aegerter, Bosshardt. Risk analysis for the Adler Tunnel[J]. **Tunnels & Tunnelling**, 1994, 11: 28 - 30.
- [38] Zhou J, Nowak A S. Integration formulas to evaluate functions of random variables[J]. **Structural Safety**, 1988, 15(26): 7 - 28.
- [39] Cherubini C, Giasi C I, Rethati L. The coefficients of variation of some geotechnical parameters[A]. **Proceedings of Conference on Probabilistic Methods in Geotechnical Engineering**[C]. Canberra: K S Liand S-C R Lo Eds, 1993. 179 - 183.
- [40] Li K S. Some common mistakes in probabilistic analysis of slopes[A]. **Proceedings of 6th Landslides International Symposium**[C]. New Zealand: [s. n.], 1991, 475 - 480.
- [41] Li K S. Point estimate method for calculating statistical moments[J]. **Journal for Engineering Mechanics**, 1992, 118: 1 506 - 1 511.
- [42] 胡小荣, 唐春安. 岩土力学参数随机场的空间变异性分析及单元体力学参数赋值研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2000, 1: 59 - 63.  
HU Xiao-rong, TANG Chun-an. Spatial variation analysis on the random field of mechanical parameters for rock and soil and the parameter estimation of elements[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2000, 1: 59 - 63.
- [43] John Anderson. Minimising underground construction risks requires maximum engineering effort[J]. **Tunnelling and underground space technology**, 1994, 13(4): 365 - 368.
- [44] 郭宏. 谈岩土工程的可靠性设计[J]. 山西建筑, 2002, 28(7): 32 - 33.  
GUO Hong. Reliability design of geotechnical engineering[J]. **Shanxi Architecture**, 2002, 28(7): 32 - 33.
- [45] 冯国栋. 地基工程中的风险与可靠性(摘译)[J]. 土工基础, 1994, 8(2): 52 - 54.  
FENG Guo-dong. Risk and reliability in ground engineering[J]. **Soil Engineering and Foundation**, 1994, 8(2): 52 - 54.
- [46] 章杨松, 罗国煜, 阎长虹. 岩石质量描述图与岩石质量风险分析探讨[J]. 地质论评, 2001, 47(2): 146 - 150.  
ZHANG Yang-song, LUO Guo-yu, YAN Chang-hong. Discussion of the description chart of rock quality and the risk analysis of rock quality [J]. **Geological Review**, 2001, 47(2): 146 - 150.
- [47] 杜时贵, 王思敬. 岩石质量指标(RQD)的各向异性分析[J]. 工程地质学报, 1996, 4(4): 48 - 54.  
DU Shi-gui, WANG Si-jing. Simple analysis of anisotropy of rock quality designation[J]. **Journal of Engineering Geology**, 1996, 4(4): 48 - 54.
- [48] 章杨松. 岩石质量指标的计算机模拟及其风险分析[J]. 地质灾害与环境保护, 2002, 13(1): 44 - 47.  
ZHANG Yang-song. Computer simulation of rock quality designation and its risk analysis[J]. **Journal of Geological Hazards and Environment Preservation**, 2002, 13(1): 44 - 47.
- [49] 庄钊文, 郁文贤, 王浩. 信息融合技术在可靠性评估中的应用[J]. 系统工程与电子技术, 2000, 22(3): 75 - 80.
- [50] 李永敏, 朱善君, 陈湘晖, 等. 基于粗糙集理论的数据挖掘模型[J]. 清华大学学报(自然科学报), 1999, 39(1): 110 - 113.  
LI Yong-min, ZHU Shan-jun, CHEN Xiang-hui. Data mining model based on rough set theory[J]. **Journal of Tsinghua University(Science & Technology)**, 1999, 39(1): 110 - 113.
- [51] 胡可云, 陆玉昌, 石纯一. 粗糙及理论及其应用进展[J]. 清华大学学报(自然科学报), 2001, 41(1): 64 - 68.  
HU Ke-yun, LU Yu-chang, SHI Chun-yi. Advances in rough set theory and its application[J]. **Journal of Tsinghua University(Science and Technology)**, 2001, 41(1): 64 - 68.
- [52] 尹旭日, 商琳, 何佳洲. Rough 集挖掘时间序列的研究[J]. 南京大学学报(自然科学), 2001, 37(2): 34 - 37.  
YIN Xu-ri, SHANG Lin, HE Gui-zhou. Research of mining time series with rough sets[J]. **Journal of Nanjing University(Natural Science)**, 2001, 37(2): 34 - 37.
- [53] 王双成, 林士敏, 陆玉昌. 用 Bayesian 网络处理具有不完整数据的问题分析[J]. 清华大学学报(自然科学报), 2000, 40(9): 53 - 60.  
WANG Shuang-cheng, LIN Shi-ming, LU Yu-chang. Analysis the problem of incomplete data with Bayesian net transacting[J]. **Journal of Tsinghua University (Science and Technology)**, 2000, 40(9): 53 - 60.
- [54] 赵卫东, 李旗号, 盛昭翰. 区间值属性不完全信息下的数据挖掘[J]. 系统工程理论方法应用, 2001, 10(2): 136 - 149.
- [55] 杨伟军, 赵传智, 施楚贤. 土木工程结构可靠度理论与设计[M]. 北京: 人民交通出版社, 1999.
- [56] 汉斯. 盖伯, 成世学, 严颖(译). 数学风险论导引[M]. 北京: 世界图书出版公司, 1997.