

工程随机力学及可靠性理论中的若干问题(下)

刘 宁

(河海大学土木工程学院, 江苏南京 210098)

摘要 结合工程实例, 在上篇基础上, 继续从随机仿真温度场及徐变应力、随机(概率)损伤-断裂力学、工程稳定性问题的概率分析、工程参数的敏感性分析以及随机反分析和可靠度反馈五个方面, 结合河海大学的研究工作进行讨论. 对今后需进一步研究的课题、应用前景以及随机力学和可靠度理论在认识上的几点分歧提出了看法.

关键词 随机力学 结构可靠度 概率分析方法 随机有限元法

中图分类号 O302 **文献标识码** A **文章编号** 1000-1980(2000)01-0001-07

在上篇^[1]中, 笔者阐述了工程可靠度理论在我国历经数十年的发展和完善, 其工程应用领域已不断扩大. 然而, 发展至今, 可靠度理论的工程应用仍因种种原因遇到一定的障碍. 一方面是由于可靠度理论本身仍不十分成熟, 或多或少地受到实际工程条件的限制(如工程中统计参数的获得等等); 另一方面, 在可靠度理论的工程应用方面还存在着认识上的分歧. 因而, 笔者感觉到有必要在阐明随机力学及可靠度理论的研究内容、在工程中的应用领域以及已取得成绩的基础上, 对可靠度工程应用方面尚需解决的问题以及对认识上的一些分歧提出个人的看法. 本文仍结合河海大学的研究特点, 继续介绍有关研究内容和已取得的工作成绩, 并从紧密结合工程、解决实际工程问题的基本点出发, 提出工程随机力学方法及工程可靠性理论在实际工程中存在的若干问题、今后的研究方向和应用前景. 这是本文也是全文的目的所在. 笔者旨在抛砖引玉, 以期随机力学和可靠度理论今后能更快发展, 在工程中能得到更好应用.

1 研究内容

作为上篇研究内容介绍的继续, 本文以下从大体积混凝土结构的随机仿真温度场及徐变应力、随机(概率)损伤-断裂力学、工程稳定性问题的概率分析、工程参数的敏感性分析以及随机反分析和可靠度反馈五个方面, 分别进行阐述.

1.1 随机仿真温度场及随机徐变应力场

随机温度及温度应力问题也是随机力学的一个重要研究方向. 大体积混凝土结构, 如重力坝、拱坝等, 无论是在施工期还是在运行期, 由于各种复杂因素的影响, 混凝土的温度场和应力场的变化过程十分复杂, 温度的变化对结构的应力状态有很大影响. 有些情况下温度应力可能超过其他荷载所引起的应力而成为影响结构安全的主要因素^[2]. 对大体积混凝土结构进行仿真计算(包括施工期和运行期), 使其温度场、应力场更接近真实状态, 是温度应力控制的基础. 正是由于混凝土温度应力场的仿真计算中存在着诸多随机性, 因此, 把握结构的随机应力场, 估算出可能出现的结构应力的摆幅, 显得十分有意义. 国外 70 年代起已着手研究温度应力的随机性^[3], 研究应用领域十分广泛, 从混凝土结构、航天器材到计算机元件等^[4,5]. 而我国对于随机温度应力(包括混凝土材料)问题还只见到极少研究成果^[6]. 纵观国内外文献可以看出, 目前的研究仍存在以下很大的不足^[7], 例如只局限于考虑外部环境因素的随机性, 只针对周期平稳随机温度场问题进行了研究, 未能综合考虑各种因素的影响; 未能给出模拟施工过程的随机仿真温度应力的计算方法; 目前国际上还未出现既将荷载视为随机激励, 又将结构物理参数视为随机场或随机变量求解混凝土结构温度应力场的随

收稿日期: 1998-11-23

基金项目: 国家自然科学基金重点项目(59739180) 国家自然科学基金资助项目(59809003).

作者简介: 刘宁(1967—), 男, 江苏靖江人, 教授, 博士生导师, 工程力学专业.

机有限元法,因而不宜应用于大型实际工程等等。为此,河海大学综合考虑各种随机因素(包括热学参数如导热系数、表面放热系数等,力学参数如弹模、徐变参数以及混凝土强度等的随机性),对混凝土结构的随机温度场和随机徐变应力场的计算方法进行了研究,提出了可以反映材料参数随机性的基于随机场局部平均的温度场随机变分原理和随机有限元列式^[8]。视温度场复频响应函数为随机函数,提出了复频响应-随机有限元法,有效地克服了前人方法不能考虑材料参数随机性的局限性^[8]。提出了计算徐变应力的复模量隐式解法,给出了相应于复模量隐式解法的复频响应-随机有限元列式^[9]。该法既可以考虑材料参数随机性的影响,又可以准确地反映周期平稳温度场随机过程特性的影响,有效地克服了前人方法(有限元谱分析法等)不能考虑材料参数随机性或需弹模为常量的局限性。对于非平稳温度场对应力的影响^[10],河海大学提出了相应于初应变隐式解法的随机有限元列式以及参数调幅逐段简化的方法,可以适用于任何确定性非稳定温度场影响下的随机徐变应力问题。在随机徐变应力作用下,混凝土结构的可靠度成为时变可靠度问题,对此,河海大学基于动态可靠度的数值解法^[12],进一步考虑了混凝土弹模、徐变度和强度的随机过程特性,对该问题进行了研究^[13]。利用所提出的方法,对一典型的重力坝进行了模拟施工过程的随机温度场、随机徐变应力场以及时变可靠度的计算,得出了若干有益的结论。

1.2 随机(概率)损伤-断裂力学

由于混凝土是一种多相颗粒复合脆性材料,在混凝土体的浇筑形成过程中,将不可避免地存在微缺陷,而各相界面也较薄弱,在收缩、温度和荷载等多种因素的共同作用下,这些微缺陷可能会汇聚发展成各种宏观裂缝,混凝土的破坏是损伤和断裂交织作用的行为^[14],这种复杂的交织可通过混凝土的损伤-断裂力学分析方法加以研究。由于受到多种随机因素的影响,如混凝土浇筑的不均匀性、骨料的随机分布以及材料参数的变异性等,确定性的分析方法已显得不适宜。而按概率断裂力学(Probabilistic Fracture Mechanics)的方法,不仅可以模拟材料力学参数的随机性,而且可以反映裂纹尺寸的随机性。河海大学在这方面也已进行了一些有益的探讨,研究了应力强度因子的概率分析方法和混凝土裂纹扩展的可靠度分析^[15]、拱坝破坏机理及损伤-断裂分析^[14],以及基于随机有限元的虚拟裂纹模型^[16]等等。相比之下,由于损伤力学出现的时间较晚,损伤力学概率分析方法的研究还不是很成熟,但研究业已开展。由于混凝土温度应力的影响,在大坝的浇筑过程中混凝土就有可能在初始损伤的基础上发展成为温度裂纹(缝)。为此,河海大学目前正结合国家自然科学基金重点项目研究随机温度应力引起的混凝土损伤-断裂问题^①。

1.3 工程稳定性问题的概率分析

在水电、交通、矿山工程中出现的高边坡、地下洞室和建筑物地基都存在着稳定性问题。在多种随机因素的影响下,确定性的方法已显得力不从心。例如,在计算边坡的稳定性时,确定性非线性随机有限元计算方法经常采用逐步减小材料强度参数 f 和 c ,直至出现极限平衡状态的方法,然后由实际强度参数与极限状态时的强度参数之比得出边坡稳定的安全系数。显然,这种方法带有人为因素(例如以何种方式降低参数, f 和 c 是否同步降低等),虽然所得安全系数具有安全储备的含义,但物理意义仍不够十分明确。笔者认为降低强度参数法一方面认为强度参数不确定(有可能会减小),另一方面又从确定性分析的途径,人为地降低强度参数进行确定性计算,彼此自相矛盾。同时, f 、 c 的变异并非同步,往往 c 值变化不大,而 f 可能变化较大(如土坡在雨水入渗之后)。相比之下,采用随机力学方法进行计算要合理得多。由于工程失稳的型式很多,限于篇幅,这里只对抗滑稳定的概率分析进行简单的讨论。总体上说,抗滑稳定的概率分析包括按材料力学方法和考虑渐进破坏的有限元法。材料力学概率分析方法即是按传统的极限平衡的思想,考虑外荷载和材料抗力的随机特性,根据极限平衡条件,建立功能函数^[17](例如,对于土坡稳定分析,可采用条分法建立功能函数^[18]),进而通过可靠度计算的多种方法计算出抗滑稳定的可靠度。显然,材料力学分析法无法考虑材料变形参数(如弹模、泊松比等)的影响,无法考虑由于局部破坏导致应力转移的影响。虽然在国际上也有学者试图通过条分法探讨土坡的渐进破坏问题^[19],但其反映的力学机理和考虑的随机因素不可能全面,显得牵强附会。考虑渐进破坏的有限元法则可考虑到材料形变参数的变异性 and 结构的局部破坏的影响,并认为一个滑动面是分先后发生失效的单元相互汇合贯通而形成,可靠指标最小的单元最危险,因而最先破坏,然后再寻求下一个失效单元,这就是渐进破坏有限元分析法的基本思想^[20,21]。可以看出,按随机有限元法进行渐进失稳分析,无

① 复杂条件下的高拱坝(300 m级)建设中的应用基础研究。国家自然科学基金重点项目。

需事先给定潜在滑动面. 如果将潜在滑动面视为结构的一个失效模式, 按随机有限元法分析抗滑稳定可靠度的问题应属于体系可靠度的范畴, 即失效模式的可靠度问题, 因而可按上篇所述的方法进行计算^[1]. 河海大学已分别对基于材料力学的随机分析方法和随机有限元渐进破坏的分析方法进行了较为详细的研究^[17], 并已应用于龙滩碾压混凝土重力坝、拉西瓦拱坝、溪洛渡地下洞室群等实际工程中的深层抗滑稳定可靠度、建基面和层面抗滑稳定可靠度、拱坝坝肩稳定可靠度以及围岩稳定可靠度等问题. 研究结果表明, 在抗滑稳定的极限状态附近, 两种方法的差别不大, 但随着外荷载的减小, 越远离极限状态, 两种方法所得结果相差越大, 材料力学法可能会导致过高地估计抗滑安全性. 另外, 需补充说明的是按材料力学法计算单层面(如建基面)的抗滑稳定可靠度应属点(元件)可靠度的范畴, 而如果存在多个层面的抗滑稳定问题(如 RCC 或 RCD 重力坝), 所有层面就构成了体系可靠度问题^[22]. 若采用随机有限元法进行渐进破坏分析, 每个层面相当于一个失效模式, 层面总体构成体系, 该体系的可靠度可在计算出各层面的抗滑稳定可靠度和层面间相关性的基础上求得^[23].

1.4 敏感性分析

敏感性(又称灵敏性)问题虽只是随机力学理论中的一小点, 但以其工程实用性而为人们所重视, 故这里也单独列出进行讨论. 虽按常规有限元法也可近似估算参数的敏感性, 但往往是通过改变参数试算的方法, 当参数较多时一方面计算量很大, 另一方面为避免参数间的相互影响, 多个参数的改变如何组合很难确定; 而按随机方法(如随机有限元)可以一次性地得出所有参数的敏感性, 无须反复计算, 且在计算可靠度对随机变量的敏感性时无须事先计算出可靠度^[24, 25].

结构可靠度对随机变量的敏感性问题可分为两种^[25]: 第一是对分布参数的敏感性, 用以反映随机变量分布参数(如均值、方差等)对可靠度的影响; 第二是对极限状态方程参数的敏感性, 用以反映分布参数一定时, 由于随机变量对极限状态方程的影响, 而导致对结构可靠度的影响. 从结构可靠度本身来看, 敏感性问题又可分为点可靠度以及体系可靠度对随机变量的敏感性. 敏感性分析的实用性主要反映在以下几方面: (a) 在对结构设计参数的优化方面. 在计算出设计参数敏感性的基础上, 可以指导结构设计参数的选取. 如果计算出结构可靠性对结构某一部位的某个强度参数十分敏感, 亦即如果该处强度参数有较小的变动, 则会对结构的可靠度产生较明显的影响, 此时如果在设计时有意识地对该参数作出较小的改善(提高材料的强度参数或作适当的处理), 则可能会带来事半功倍的效果. 例如, 河海大学对一典型重力坝进行敏感性分析的计算结果表明^[25], 建基面抗滑稳定的可靠度对建基面的 f 值最为敏感, 因此, 若要提高抗滑稳定性, 首先考虑的应是提高建基面设计参数的 f 值. (b) 在指导勘测、试验和控制施工质量方面. 如果可靠度对某一参数的敏感性较大, 则要求所提供的数据应相对较为精确, 也同时要求在进行试验或现场勘测以获得该参数时应尽可能地准确, 而在设计参数确定后, 在施工时应尽可能地保证施工质量. 例如, 河海大学对某一地下洞室围岩稳定的敏感性计算表明^①, 在对初始地应力场的敏感性方面, 围岩稳定的可靠度对第四号岩体材料(该岩体处于洞室开挖位置)的 X 向和 Y 向初始地应力的敏感性最大, 而对山体地表附近初始地应力的敏感性最小, 这就要求我们最好能准确地现场测量到第四号材料所在处的初始地应力, 而不是只测出山体地表附近的应力, 而后再通过地应力场的回归分析得到整体地应力场. 对材料强度参数敏感性的计算结果也有类似的特点. 因此, 在这种情况下, “实时观测, 即时预报”的方法显得十分重要, 即在实际施工过程中把握洞室周围的情况, 并即时反馈给设计者重新作出决断. (c) 方便结构安全性的校核. 在工程的设计阶段, 往往需根据结构校核情况对设计参数进行调整. 众所周知, 在利用常规有限元法进行结构设计的校核时, 设计参数虽只作微小的改变, 但往往整个有限元计算需从头做起, 十分费时. 由于敏感性在数学上可以以对随机变量的一阶偏导数表示, 因此在计算出敏感性结果的基础上, 可以方便地通过一阶 Taylor 展式, 求出参数改变后的结构响应, 从而无须对结构再重新进行计算. (d) 在估算结构的可靠度方面. 前面已经叙述了对于大型复杂结构, 如果随机因素又很多, 基于随机有限元的可靠度计算可能会十分费时, 如果还要考虑材料的非线性效应, 计算工作更大. 为减小工作量而又使精度能满足工程需要, 目前国际上一般采用在正式计算前的敏感性分析法^[26]. 如果敏感性很小, 则在计算过程中该随机变量可以作为常数处理, 从而节省工作量, 提高计算效率. 例如, 一典型重力坝的可靠度对坝体弹模最不敏感^[25], 因此, 如果坝体弹模的变异系数不大, 就可不作为随机变量. 正是由

① 溪洛渡地下洞室群围岩稳定的非线性随机有限元分析及可靠度计算. 河海大学工程可靠性研究室, 1997 年 12 月.

于敏感性分析的实用性,Madsen等人早已开展这方面的大量研究工作^[27].河海大学也在这一领域分别对线弹性结构^[25]、弹塑性结构^[24]的点可靠度、失效模式可靠度以及体系可靠度对随机变量的敏感性(包括分布参数和极限状态方程参数)计算方法进行了研究.

1.5 随机反分析和可靠度反馈

至今出现的随机力学分析方法及可靠度计算,绝大部分都属于正分析问题,即在给定设计参数统计特性的情况下,对结构进行随机力学分析,并校核工程的可靠度^[28].根据实测资料,进行工程设计参数的反演分析和安全监控的反馈分析,可对工程的工作性态作出科学的评价,对于病险工程,可为加固处理提供科学依据.目前,确定性反分析和安全监控方法在水利和岩土工程中都已得到了普遍应用^[29,30].然而,由于工程中客观存在的随机因素(如荷载和材料参数的随机性)会导致监控量测数据的随机性,而且多种原因引起的监控数据的误差,使量测数据具有离散性和不定性,如地下洞室的变形监测值可视为一个随机变量,变形过程则是一个随机过程^[31].为解决这一问题,正如正分析安全问题中安全系数无法考虑随机因素的影响一样,传统的确定性反分析方法也已显得力不从心.

这一领域的研究内容包括两部分:随机参数的反分析方法和可靠度反馈(可靠度评价及预测).对于参数的估计,实际上应属系统辨识(System Identification)理论的范畴^[32].目前已出现的方法主要有:Bayesian反分析法、最大似然法以及卡尔曼滤波法等等^[31].对于水工结构工程,可分别针对监测数据(包括位移、应力、温度和渗流的监测值),从静态和动态两大方面,分别将监测数据描述为随机变量和随机过程两种情况,通过随机反分析理论,系统地研究出结构实际的材料参数,包括变形模量、抗力参数以及混凝土导热系数和基岩的渗透系数或渗透张量等,在动态方面还要考虑材料的蠕变特性(如混凝土的徐变和岩石的粘、弹、塑性),随机反演出材料的徐变(或粘性)参数.

可靠度反馈包括两方面的含义:(a)在给定结构的目标可靠指标的基础上,反算出结构所需的材料参数.例如,在给定结构的可靠指标必须大于4.2时(一级建筑物的设计标准),反算出混凝土所需的强度(包括均值和标准差).目前,国外已有学者在这一方面开展了研究^[33],而在我国则尚未出现任何报道;(b)在获得随机反演结果的基础上,对结构作出可靠度的评价和预测.在这一方面,可靠度反馈和在初设阶段所进行的可靠度校核的区别主要在于:可靠度反馈所需的输入数据是设计参数经随机反演而被更新,需考虑先验信息的影响,这就是所谓的‘先验(条件)随机问题’的研究背景^[34],同时也是研究已有建筑物可靠性的基础^[35],目前研究得较多的是‘条件随机场’问题^[36].由于随机反演分静态和动态,相应的可靠度反馈也应分为静态和动态.如在自重、水压以及运行期准稳定温度场和坝基稳定渗流场的共同作用下的坝体(坝基)的静态可靠度反馈分析,以及在施工期累计自重和随机温度应力的影响下坝体的动态(时变)可靠度反馈.显然,如果基于静态分析,则只能对结构进行可靠度评价,无法对将来进行预测.而动态分析则不仅可评价现时的可靠度,而且可对将来进行预测,即所谓可靠度预报.目前,河海大学在国家自然科学基金的资助下,正积极开展水工混凝土结构随机反分析和可靠度反馈方面的研究^①.

2 随机分析流程及说明

2.1 随机分析流程

随机力学分析大体上可由以下的流程(图1)表示.

2.2 几点说明

a. 随机力学的研究领域和应用范围很广,本文上、下篇仅从十个方面进行讨论,该流程图只是从作图方便、形象出发,将输出分为三部分.从图中可以清楚地看出,可靠度只是通过随机力学的计算方法而得到的一个部分.

b. 图中的‘随机响应’对不同的工程问题应有不同解释,位移和应力只是最基本的两点.如对于大体积混凝土结构随机温度问题,随机响应就应是温度均值、标准差以及温度场的相关结构.

c. 图中可靠度结果只是从点可靠度和体系可靠度分类.从工程应用领域角度也可进行分类,如稳定可靠度、裂纹扩展可靠度等等.

① 刘宁.水工混凝土结构的可靠度反分析理论方法及其应用.国家自然科学基金资助项目.

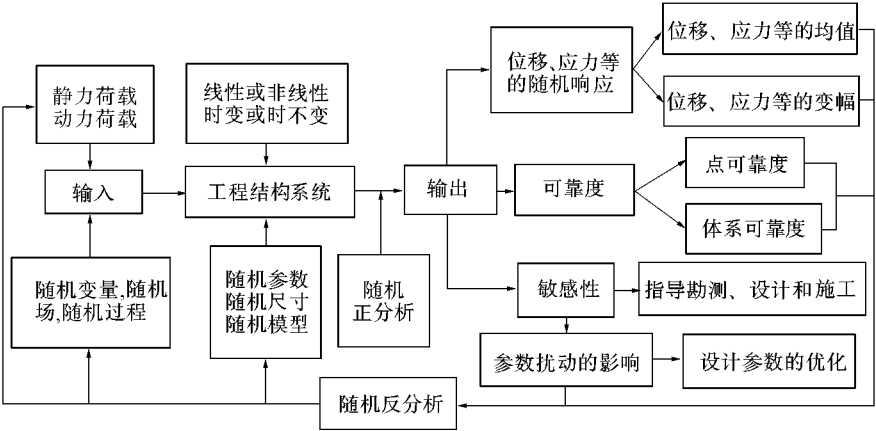


图 1 随机力学分析流程图

Fig.1 Flow-chart of stochastic mechanics analysis

d. 经过结构参数的随机反分析后,重新输出的可靠度(可靠度反馈)还需考虑先验信息的影响,图中未绘出.

3 讨 论

随机力学和可靠度理论发展已经历了大量的实践检验,由于所处环境和思考问题的出发点不同,加上长期以来习惯于基于安全系数沿用传统的方法进行设计,在实践中自然可能会产生不同的意见分歧.笔者以为这需要经过一个反复的认识过程.通过不断地反复研究、应用和总结,不仅可逐步突破传统的思想方法,而且可使随机力学和可靠度无论在理论上还是在工程实用方面都能更好地发展,更紧密地结合工程,为实际工程服务.

随机分析与确定性分析是相辅相成的,并不矛盾.一般来说,随机力学方法均需基于确定性的力学分析方法而进行,如目前已出现的随机有限元法需基于常规确定性的有限元方法^[37], Monte-Carlo 随机有限元法是个典型,对每次的抽样计算都是在确定性有限元计算上进行(国外一般都是基于有限元大型商业软件包上完成).又如,河海大学习惯采用的随机有限元的梯度分析法,无论是对线弹性还是对非线性问题,零次方程就是常规的有限元支配方程,而一次甚至二次方程都是由常规有限元方程经偏微分推导得出,求解的第一步(响应的均值的计算)实际上是进行的常规有限元计算,而后才是考虑到参数的不确定性,计算出响应可能出现的变幅(标准差),直至可靠度.因此,计算结果的第一步就是常规有限元计算结果.事实上,笔者认为随机力学的发展一般需建立在比较成熟的确定性力学分析方法的基础上,对于新近问世的新理论、新方法,在尚未得到公认时不宜盲目地推广于随机性分析,否则模型本身对随机分析结果造成的误差可能会比较大.另一方面,结构可靠指标与安全系数相比,两者之间也有共同点,可靠度理论中分项系数的方法已使可靠度能定量地反映在安全系数的确定上^[28].

实际工程中的众多不确定因素肯定了随机力学和可靠度理论的重要性,但同时,也对随机力学和可靠度理论的实用性提出了挑战.一方面,如果在计算中要做到面面俱到,用不确定、怀疑的眼光看待一切,不分轻重,事无巨细,必将导致不可知论,结果当然是一事无成.只有抓住主要矛盾(主要随机因素),进行适当的处理,才能达到事半功倍的效果.例如坝体自重因变异性较小而无须作为随机变量,对于一般结构,几何尺寸也无须视为随机.进行随机因素的敏感性分析也正体现了这一点,敏感性较小的随机变量如果变异性不是太大,则可以不作为随机变量处理.另一方面,实际工程中的不确定性常常在“未确知性”方面表现得十分强烈,体现为数据信息不充分.例如,由于坝基岩体的复杂性,有可能存在着大量未知的裂隙和节理,因经费等原因,现场勘测不可能获得很多资料,所得资料也许不能满足随机力学分析所需的统计信息,不充分的统计信息使人们无法准确地计算出结构的随机响应(包括可靠度),从而导致所谓“可靠度不可靠”的问题.就这一点,笔者认为可以从以下几方面进行认识:(a)与确定性分析相比,随机分析不仅考虑了参数的均值,而且考虑了参数的方差.确定性分析所用的参数实际上相当于随机参数的均值,如果统计信息少到连均值都无法得出,确定性计算也将无法进行.(b)如果承认参数的不确定性,笔者以为对不确定(随机)的参数用一个可能的

范围(标准差)而不是用一个简单的数(相当于均值)去描述效果要更好。一般来说,对实际工程,参数可能出现的变化范围不难得出。如某一工程的岩体弹模因钻孔试验较少而无法统计,但现场人员根据岩芯的特点、试验值和工程经验,可得弹模的范围在 12 ~ 14 GPa。事实上,通过参数的变化幅度,可以通过“ 3σ ”原则(变化范围为标准差的三倍)近似地估算出参数的标准差。(c)在传统的安全系数方法中,对于某些不甚清楚的条件或参数,人们可以根据经验确定出相应的安全系数,事实上,在采用随机方法进行分析或设计时,同样可以吸收专家经验进行研究,如采用 Bayes 方法等。在信息较少的情况下,还可通过多种手段弥补信息量的不足。例如,采用类比扩充母体样本容量的方法,甚至借助模糊数学的手段^[38],利用人类的经验进行判断。(d)如前所说,随机力学分析包括的内容很广,可靠度计算只是一个方面,因此,退一步讲,如果根本无法得到参数的统计信息,在承认参数不确定性的基础上,仍可进行其他一系列有益的工作,如进行参数的敏感性分析等。

4 发展方向和前景

通过近十年的研究和实践,在领略到随机力学和可靠度理论的优越性的同时,笔者感到仍有许多问题需要我们进一步深入地进行研究。在不确定因素方面,实际工程经常会遇到主观认识的不确定性,例如对结构的设计方案是好还是坏的判断具有模糊性。因此,将主观认识的不确定性处理方法与随机力学理论相结合,可以更好地反映实际。在混凝土材料强度的机理方面,由于混凝土的骨料粒径、分布以及与砂浆粘结程度等的随机性,导致混凝土强度的随机性,显然,采用随机力学的方法研究混凝土的强度机理很有意义。在计算模型的不确定性方面,如何考虑计算模型的不确定性影响也是一个很现实的问题。在目标可靠指标的确定方面,在同时考虑投资经济和灾害损失的基础上,通过优化的方法,合理地确定出结构设计的目标可靠指标,是作出最佳设计方案的第一步。在随机方法的实验验证方面,如何通过部分实验结果和计算机实验模拟相结合的方法,对随机分析结果进行实验验证,是完善理论方法的一个重点。等等。笔者深切地感到回避存在的问题只能导致研究的停滞不前,并为实践所淘汰。只有意识到问题,才能去设法解决问题,更好地为工程服务。同时也要看到任何一个学科的发展都不是一帆风顺的,研究的道路是曲折的,但前途是光明的。笔者坚信随机力学和可靠度理论必将随着研究的深入和大量实践越来越受到重视,在工程中也将扮演越来越重要的角色。

致谢 河海大学和清华大学众多老师们多年来对笔者的教育、关心和帮助,难以道尽。此外,长江科学院前院长包承纲教授、上海同济大学地下工程系高大纲教授、香港科技大学邓汉忠教授(系主任)、北京水利水电管理干部学院黎保琨教授、成都西南交通大学陈虬教授等给予笔者的指点、启发和鼓励,同济大学地下工程系杨林德教授(系主任)等提供的部分资料,才使笔者能顺利完成全文,笔者也向他们表示衷心的感谢。

参考文献:

- [1] 刘宁,郑建青.工程随机力学及可靠性理论中的若干问题(上)[J].河海大学学报,1999,27(5):1~7.
- [2] 朱伯芳.水工混凝土结构温度应力与温度控制[M].北京:水利电力出版社,1976.100~150.
- [3] Heller R A, Temperature response of an infinitely thick slab to random surface temperature[J]. Mech Research Communication, 1976 (3):379~385.
- [4] Bazant Z P, Wang T S. Spectral finite element analysis of random shrinkage in concrete[J]. J of Struct Eng(ASCE),1984,110(9):2196~2211.
- [5] Shigekazu K, Noriyuki A, Takahiro D, et al. Application of SFEM to thermal analysis for computer cooling[J]. J of Electronic Packaging, Transactions of the ASME,1993 270~275.
- [6] 王同生.混凝土结构的随机温度应力[J],水利学报,1985(1):23~31.
- [7] 刘宁,刘光廷.混凝土结构的随机温度场及随机徐变应力[J].力学进展,1998,28(1):58~70.
- [8] 刘宁,刘光廷.大体积混凝土结构温度场的随机有限元算法[J].清华大学学报,1996,36(1):41~47.
- [9] LIU Ning,LIU Guang-tin. Spectral finite element analysis of periodic thermal creep stress in concrete[J],Eng Struct,1996,18(9):669~674.
- [10] LIU Ning, LIU Guang-tin. Research on non-stationary random thermal creep stresses in mass concrete structures[J]. Finite Elements in Analysis and Design, 1997,26:83~95.
- [11] 刘宁,刘光廷.非平稳温度场影响下混凝土结构的随机温度徐变应力[J].应用力学学报,1998,15(2):67~73.
- [12] LIU Ning. A computational method for time-dependent reliability[J]. Acta Mechanica Sinica, 1996,12(4):377~386.

- [13] 刘宁,刘光廷.混凝土结构随机温度徐变应力的首次超越可靠度[J].固体力学学报,1998,19(1):38~44.
- [14] 徐道远,符晓陵.拱坝破坏机理及损伤-断裂分析[A].见:国家自然科学基金委员会水利学科主编.全国高拱坝学术研讨会论文集[C].北京:水利电力出版社,1996.208~217.
- [15] 符晓陵,徐道远,张林兵.混凝土大坝裂纹扩展的可靠度分析[A].见:吴世伟主编.工程结构可靠性全国第二届学术会议论文集[C].南京:河海大学出版社,1992.674~681.
- [16] 武清玺,张玉慧.地下结构开裂问题可靠度分析[J].河海大学学报,1997,25(6):23~30.
- [17] LIU Ning, WANG Yuan, WU Shi-wei. Reliability analysis of gravity dam with weak layers[A]. In: LIU Huai-heng. Proc of Int Sym on Application of Computer Methods in Rock Mechanics and Engineering[C]. Shanghai: Shanghai Science and Technology Press, 1993. 1265~1270.
- [18] 姚耀武,陈东伟.土坡稳定可靠度分析[J].岩土工程学报,1994,16(2):30~87.
- [19] Chowdhury R N, Grivas D A. Probabilistic model of progressive failure of slopes[J]. J of Geotech Eng, 1982,108(6):803~819.
- [20] Folz B, Foschi R O. Stochastic finite element analysis of progressive failure in a laminated wood beam[A]. In: Schueller, Shinozuka and Yao. Int Conf on Structural Safety and Reliability, ICOSSAR '93[C]. Rotterdam: Balkema, 1994. 585~592.
- [21] 刘宁,李同春,卓家寿.用三维随机有限元寻求结构的最大可能失效模式[J].水利学报,1996(3):36~43.
- [22] 刘宁.碾压混凝土重力坝的层面特性及抗滑稳定可靠度[J].水利水电科技进展,1993,13(2):29~34.
- [23] LIU Ning, LI Tong-chun, ZHUO Jia-shou. Research of correlation between 3-D structural failure modes[J]. Annual Report of Sci & Tech—Supplement of JHU, 1995,23(1):93~97.
- [24] LIU Ning. Sensitivity analysis of 3-D elasto-plastic structural reliability[J]. Acta Mechanica Solida Sinica, 1996,9(4):296~305.
- [25] 刘宁,吕泰仁.三维结构可靠度对随机变量的敏感性分析[J].工程力学,1995,12(2):119~128.
- [26] Schueller G I. A state-of-the-art report on computational stochastic mechanics[J]. Probabilistic Engineering Mechanics, 1997,12(4):197~321.
- [27] Madsen H O, Krenk S, Lind N C. Methods of structural safety[M]. New York: Springer Verlag, 1986.70~90.
- [28] 吴世伟.结构可靠度分析[M].北京:交通出版社,1988.50~80.
- [29] 吴中如.水工建筑物安全监控理论及其应用[M].南京:河海大学出版社,1990.90~120.
- [30] 杨林德.岩土工程问题的反演分析及其工程应用[M].北京:科学出版社,1996.70~100.
- [31] 孙钧,蒋树屏,袁勇等.岩土力学反演问题的随机理论与方法[M].汕头:汕头大学出版社,1996.110~140.
- [32] Eykhoff P. System identification: Parameter and state estimation[M]. New York: John Wiley and Sons, 1974.150~180.
- [33] Foschi R O, Li H. Inverse reliability method and applications in offshore engineering[A]. In: Schueller, Shinozuka & Yao. Structural Safety and Reliability (ICOSSAR '97)[C]. Rotterdam: Balkema, 1998. 551~557.
- [34] Hoshiya M, Yoshida I. Observation and conditional stochastic FEM[A]. In: ASCE. Probabilistic Mechanics and Structural and Geotechnical Reliability[C]. New York: John-Wiley and Sons, 1996.178~181.
- [35] Yao J T P. Safety and reliability of existing structures[M]. Boston, London and Melbourne: Pitman Advanced Pub Program, 1985.40~70.
- [36] Hoshiya Masaru. Kriging and conditional simulation of Gaussian field[J]. J of Eng Mech ASCE, 1995, 121(2):181~186.
- [37] 刘宁,吕泰仁.随机有限元及其工程应用[J].力学进展,1995,25(1):114~126.
- [38] 王光远,陈树勋.工程结构系统软设计理论及应用[M].北京:国防工业出版社,1996.80~110.

Stochastic Mechanics and Reliability Theory in Engineering: Part-2

LIU Ning

(College of Civil Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China)

Abstract: As a follow-up to Part-1, this paper briefly and continuously introduces random temperature field, random thermal creep stress of mass concrete structures and probabilistic fracture mechanics, probabilistic analysis of engineering stability, sensitivity analysis of engineering parameters as well as random back-analysis and inverse reliability problems. Some practical engineering examples in conjunction with the research performed at Hohai University are given for demonstration. Future topics of theoretical research and applications are suggested. Some comments are given on some different viewpoints on both stochastic engineering mechanics and structural reliability theory.

Key words: stochastic mechanics; structural reliability; probabilistic method; stochastic finite element method