

工程随机力学及可靠性理论中的若干问题(上)*

刘 宁

郑建青

(河海大学土木工程学院 南京 210098) (浙江省温州市水利水电勘测设计院 温州 325000)

摘 要 简要介绍了国内外工程随机力学及工程可靠性研究动态,以实际工程问题为背景,从若干方面阐明了实际工程中的不确定因素,并结合河海大学所做的工作,介绍了随机有限元法,随机场的离散,工程结构点可靠度,体系可靠度、时变可靠度,非线性材料的随机力学方法以及随机动力问题 5 个方面的研究现状和工程应用情况。

关键词 随机力学,可靠度,概率,随机有限元

中图分类号 O302

本文所指工程随机力学是考虑土木水利工程(以下简称“工程”)中的随机因素,基于概率和数理统计方法,对工程问题进行力学分析,而工程可靠性理论则是基于工程随机力学方法,对工程的安全性、适用性和耐久性从概率的角度进行度量,度量结果以概率形式(可靠度)表示,其中,工程安全性的大小表示为安全度,因而,可靠性的含义比安全性的含义更广^[1],工程可靠性理论也往往被称为可靠度理论。

传统上,人们习惯以安全系数作为水利工程的评价指标,然而,安全系数只是一个由确定的信息得到的一个定值,它未能考虑设计变量中任何客观存在的变异性,某一特定的安全系数值,对于不同的工程未必具有同样的意义,换句话说,安全系数的大小并不能完全确切地表征工程的安全程度,权威人士指出:“在计算科学日新月异的今天,计算参数与实际情况相比它所具有的精度已远远落后于工程结构的精确分析。”如果不考虑设计参数的不确定性,结构的精确分析所能取得的效益将被粗略的经验性安全指标所淹没。^[2]因此,考虑实际工程中的不确定因素,对工程进行随机力学分析和可靠度评估显然具有十分重要的意义。

自从 1946 年 Freudenthal 在国际上发表“结构的安全度”以来,人们已充分意识到实际工程的随机因素,应用随机力学解决工程中的随机性问题,将概率设计的思想引入实际工程^[3],1997 年在日本京都市召开了结构安全性和可靠性国际会议(ICOSSAR '97),所涉及的内容十分丰富,其中,奥地利 Innsbruck 大学的 Schueller 作了题为“结构可靠度的研究进展”特邀重点报告^[4],1997 年底,国际结构安全性期刊(Struct. Safety)的编委们联合撰写了题为“计算随机力学的研究动态”一文^[5],从多个角度综述了计算随机力学的最新进展,近期在上海召开的中美日三国土木与基础工程系统交流会上^[6],又有多位国际著名专家如美国南加州大学的 Shinozuka、日本武藏工业大学的星谷胜(Hoshiya)以及香港科技大学的邓汉忠(Wilson H. Tang)等学者,作了内容丰富的报告,可以看出,在国际学术界,工程随机力学在近几年又有了长足的进展^[7],1999 年底,在澳大利亚将迎来第八届统计概率应用国际盛会(ICASP8),相信届时又会涌现一批有价值的文章,在理论方法上又有新的突破,我国结构可靠度理论的研究起步相对较晚,60 年代曾广泛开展结构安全度的研究与讨论,70 年代开始把半经验半概率的方法(水准 I 法)用到 6 种结构设计的规范中,至 80 年代,我国已掀起结构可靠度研究和应用的热潮,涌现出一批结构可靠度理论的专著^[1,8],研究成果被应用于许多大型工程,此外,建筑、铁路、公路、水运和水利五大部门还联合编制了《工程结构可靠度设计统一标准》,1992 年在河海大学召开的“工程结构可靠性全国第三届学术讨论会”再一次将结构可靠度在国内的研究推向高潮,1995 年在西安又成功地召开了“工程结构可靠性全国第四届学术讨论会”,标志着可靠度研究仍保持持续发展的良好势头,至今,在我国的土木、水利工程应用领域,可靠度理论的研究已历经了 20 余年,在这 20 余年的时间里,一方面工程可靠性理论在众多工程领域中得到检验;另一方面,通过反复认识和大量实践,工程可靠性研究已在

收稿日期:1998-11-23

第一作者简介:刘宁,男,教授,博士生导师,工程力学专业。

* 国家自然科学基金重点项目(59739180)和国家自然科学基金项目(59809003)资助课题。

理论上不断地被深化,在实践上正逐步转向更有效地为工程服务。

河海大学在吴世伟教授等开创性研究的基础上,历经10余年的发展,在工程随机力学和可靠性理论方面进行了大量的工作,研究成果业已成功地应用于李家峡、二滩、三峡、龙滩、小湾、普定、拉西瓦、清江隔河岩等近20个大型水利工程设计的可靠度校核中。笔者感到有必要对已有工作进行较为全面的总结,一方面为在理论上更好地发展和完善打好基础,另一方面也为实际工程应用总结经验,克服不足,以便更好地为工程服务。

1 实际工程中的不确定因素

从数学角度来分类,工程中的不确定因素可以分为3种^[9]:随机性(random)、模糊性(fuzzy)以及未确知性(unascertainty)。前两类不确定性早已为人们所认识,而未确知性是指由于信息、数据的不全面、不完整而导致的不确定性。目前工程中接触较多、研究相对比较成熟的是工程随机性问题。工程随机力学是针对工程随机性问题进行力学分析的。本文以下如不作特别声明,不确定性即指随机性。

随机因素又可进一步分为随机变量、随机场(random field)^[10]、随机过程以及随机场和随机过程的结合。随机变量用来描述与时空无关的单一变量的随机特性;对于具有空间分布特性的随机参数则需用随机场加以描述,如岩土材料的强度参数 f, c 。对于给定的坐标位置,随机场则退化为随机变量。随机过程则用来描述在时间上具有时变特性的随机参数,如地震加速度;有时,有些现象可能同时表现出时间和空间上的变异性,如大坝混凝土的随机温度场^[11],这时就需以随机场过程加以模拟。

从工程背景来分类,不确定因素体现在以下几方面:

1.1 荷载的不确定性

在静力问题方面,对于水工结构(如重力坝),可能出现的荷载主要有:自重、上下游的水压力、坝基的扬压力以及温度荷载等。自重的变异性一般较小,可以不作为随机变量,而上下游水位的变化往往难以预料,将其描述为随机变量比较合理。河海大学工程可靠性研究室对我国82座大坝上游水位的统计结果表明,上游水位的变异系数(标准差与均值之比)在0.06左右^[12]。由于上下游水位的不确定性,导致了坝基扬压力的不确定性。温度荷载与混凝土的热力学参数、入仓温度、环境温度以及施工浇筑方式等因素有关。这些因素也存在着很大的不确定性^[13],由此导致了温度荷载的不确定性。河海大学在进行国家“八五”科技攻关的研究中,针对小湾和拉西瓦拱坝,已考虑了温度荷载的不确定性产生的影响。关于地下洞室问题,荷载主要是地应力和渗透力。初始地应力场一般是根据几个测孔的量测值通过回归的方法近似地获得,其不确定性主要来源于地应力场空间量测数据的离散性、实际地应力场与实测地应力场的数据间的误差以及回归分析计算模型的不确定性。不同的计算模型可能会带来30%以上的偏差。为把握地应力的随机性,河海大学在进行国家“九五”科技攻关的研究中,针对溪洛渡地下洞室工程中地应力回归系数的随机性,提出了方差回归和二次回归的计算方法。由于地质条件复杂,实际工程中的渗流场也很难准确把握,随机渗流场计算的重要性已被人们所认识^[14,15]。在动力问题方面,水利工程一般考虑地震荷载的影响。地震荷载的随机性极为强烈。在国家“九五”科技攻关中,高坝结构的随机地震响应问题已列为主要研究内容之一。由此可见,实际工程中的荷载在很大程度上需视为随机变量加以研究。

1.2 材料参数的不确定性

材料参数包括材料热学参数和力学参数。关于材料的热学参数(包括混凝土的水化热参数以及导热系数、导温系数和表面放热系数等)笔者在大体积混凝土结构的随机温度场研究(中国博士后科学基金内容)^[11,13]对混凝土热学参数的随机性及其影响作过较为详细的研究。对一典型重力坝坝体混凝土温度场的计算表明,在混凝土和基岩的随机热学参数(包括混凝土水化热参数)及随机环境温度(包括库水温度及气温)等因素的共同作用下,坝体内混凝土温度的最大标准差约为4℃。材料的力学参数包括变形模量、泊松比以及强度参数(如抗压强度、抗拉强度以及 f, c 等)。大量的统计资料表明,坝体混凝土变形模量的变异系数范围约为0.1~0.2,而基岩则约为0.2~0.3,泊松比的变异性相对较小,而对土性材料来说,其变异系数有时可达0.3以上。混凝土抗压强度、抗拉强度的变异系数往往在0.2左右,最大可达0.3,而岩土材料 f 和 c 的变异性则较大^[16],尤其是 c 值,其变异系数有时可高达0.5左右,且 f 和 c 的空间随机场特性十分明显。因此,对于有明显变异性的参数,如果仍沿用传统的方法,只简单地以一个确定的值(相当于随机变量的均值)

来描述某一材料参数,计算结果很难反映实际情况.

1.3 几何尺寸的不确定性

众所周知,在同样的条件下,具有不同几何尺寸的结构,结构的响应(包括应力、位移等)也不相同.一般而言,上部结构几何尺寸的变异性很小,但不排除在结构敏感部位几何尺寸可能存在的微小变异带来的显著影响.基岩部分,断层、裂隙、节理等结构面的几何分布情况(包括走向、倾角以及间距等)一般很难准确把握,而这些结构面的几何分布情况对于计算地基的应力场以及渗流场至关重要(尤其是对渗流场).但由于几何不确定性问题有限元计算的复杂性,就笔者所知,至今国际上在此方面的研究成果还很少^[17].

1.4 初始条件和边界条件的不确定性

无论是应力场、渗流场还是温度场的计算,都要考虑边界条件的影响,对于动力问题或者非稳定问题,初始条件的影响也不容忽视.模拟实际工程所建立的几何物理模型,在遵循仿真和简便两大原则的同时,边界条件往往需作一定程度的简化.边界条件的不确定性来源于实际问题的复杂性、边界条件变化的不可预知性、人类认识的局限性以及对结构边界处的简化处理等.以大体积混凝土结构的不稳定温度场为例,作为初始条件的混凝土入仓温度受到原材料温度、出机口温度和气温的影响,视为随机较为合理^[13],其变异系数可能会达到 0.1 以上.作为温度场问题的边界条件,在统一用第三类边界条件模拟时,由于气温、日照、库水温度以及导热系数和表面放热系数随机性的影响,边界温度的随机性更为强烈^[11,13].目前,对于渗流和热传导问题,河海大学已对边界条件的随机性影响进行了研究^[13,14];但对于应力问题,研究成果尚未见报道.

1.5 计算模型的不确定性

由于实际工程材料(如混凝土和岩石)的复杂性,一般情况下,可根据室内试验、工程地质资料甚至工程经验初步确定材料模型的类别,但符合选模原则的最佳模型应该只有一个,这正是模型识别理论的工程背景^[18].事实上,不论采用何种本构理论和强度准则都不可能绝对准确地反映材料的本构关系和破坏特性.至今,针对不同的材料,人们已提出了许多本构模型和强度准则.不同的模型所反映的侧重点不同,如混凝土的最大拉应力准则、四参数准则、五参数准则等,但不同准则所计算出的结果则可能相差很大.例如,可采用 $D-P$ (Drucker-Prager)准则或 $M-C$ (Mohr-Coulomb)准则近似地模拟岩体的破坏,很难说哪一种准则对于任何一类岩体都十分准确.对于硬岩,我们可能会偏爱于使用 $D-P$ 准则,而对于软岩(尤其是很软的岩体夹层直至土质材料),采用 $M-C$ 准则效果可能会更好.然而,什么叫硬岩,什么叫软岩,在很大程度上是个模糊的概念.采用 $D-P$ 准则和 $M-C$ 准则所得结果有时会相差很大.计算模型的不确定性在国际上已引起国内外学者的研究兴趣,目前已出现针对一些简单问题的研究报道^[19,20].

2 研究内容及应用领域

既然工程中客观地存在着众多不确定因素,常规确定性的分析方法显然不易胜任.工程中不确定问题的概率分析包括以下三大方面:(a)工程随机力学;(b)工程的风险评估和可靠度分析;(c)基于可靠度理论的规范设计方法.在工程随机力学方面,又大致包括 4 个方面的研究内容:随机过程和随机场数字模拟、随机振动、随机有限元法(或随机边界元法和其它随机离散数值方法)以及随机断裂力学及随机损伤力学.在工程的风险评估和可靠度分析方面,研究内容大致包括:工程参数、荷载和模型等不确定性的数学描述及定量分析,风险和可靠度分析以及工程消耗估计和损失预测等.而在基于可靠度理论的规范设计方面,研究内容主要包括:基于响应的设计方法、基于结构功能的设计方法、容许极限状态的概率分析方法、允许应力条件下的概率设计方法(LRFD)、可靠度优化问题、荷载组合问题及地震作用下的概率设计方法等.

由于以上内容涉及到的内容太广,笔者只拟就以上部分内容,结合近几年河海大学所做的研究工作和工程应用情况,从以下 5 个方面进行论述.全文之下篇将从另外 5 个方面进行讨论.

2.1 随机有限元法

作为随机力学的一个主要部分,随机有限元法业已经过 20 余年的发展,目前已成为分析随机因素影响下结构随机响应的强有力的工具.笔者已在《力学进展》中较详细地综述了随机有限元的发展史^[21].至今,已出现的随机有限元法大体上包括:直接 Monte-Carlo 法、改进的 Monte-Carlo 法(包括纽曼级数展开法以及拉丁超立方抽样法等)、摄动法、直接偏微分法(亦称梯度分析法)、加权积分法(Weighted Integral Method)以及响应面法(Response Surface Method)等.直接 Monte-Carlo 法由于太费时而显得很实用,改进的 Monte-Carlo 法虽在

效率上比直接 Monte-Carlo 法有了较大的提高,但一般仍难应用于大型工程问题。加权积分法对于随机场特性比较显著的情形精度较高,但由于公式比较繁琐,至今尚未见应用于三维块体结构的报道^[15,22]。响应面法的最大优点是可以利用确定性有限元的大型商业软件进行计算,在西方国家比较流行。该法在得出响应面的基础上可以较方便地进行可靠度的计算,但该法实质上仍基于重要抽样技术,在大型问题及随机因素较多的情况下,效率较低。河海大学提出的直接偏微分法与摄动法相比,可以十分方便地得出有限元的一次方程甚至二次支配方程^[21~24],尤其是对于非线性问题,可直接与迭代计算方法相结合,效率较高^[25,26]。由于直接偏微分法的核心是功能函数的梯度运算,因而亦称梯度分析法。河海大学已在拉西瓦、小湾拱坝的可靠度分析以及溪洛渡地下洞室围岩稳定的可靠度分析等多个重要工程项目中成功地应用了该法,取得了令人满意的结果。

2.2 随机场的模拟及离散

随机场的模拟及离散是随机力学分析的一个重要方面^[21]。由于参数的空间变异特性,如果用单一的随机变量来描述,可能会过低估计实际的可靠度^[10,16]。由于常利用有限元来离散结构,用来描述参数空间变异特性的随机场相应地也需作离散处理。至今已出现多种随机场的离散方法,如中心点离散法、加权积分法、局部插值法和局部平均法等。其中,局部平均法由于具有高效、对相关结构不敏感、对原始数据要求较低等特点而被众多学者采用。实际工程中,材料参数往往需要以多个随机场加以描述,这些随机场间又存在着互相关性,这时需以向量随机场加以描述^[18,27]。例如,基岩内每种岩体材料的弹模为随机场(标量),总体则构成向量随机场。鉴于实际随机场问题应为三维,而由于受到计算量和试验数据的限制,国内外随机场的计算模型还仅局限于一维或二维模型^[27]。为此,河海大学提出了适用于工程实际的三维可分向随机场模型,视结构材料参数为混合坐标架中可部分(或完全)分离的三维向量随机场,并在整体坐标系中将随机场在三维等参元中进行局部平均,给出了计算方法及相应的三维随机有限元列式^[28]。该法的优点是,既可反映三维特性,对试验数据量的要求又大大降低,且向低维情况退化十分方便。研究结果表明,对强度参数随机场,采用方差折减系数的方法是可行的,然而对弹性模量的随机场,进行方差折减可能会导致相反的结论。

2.3 点(元件)可靠度、体系可靠度及时变可靠度

点可靠度(亦称元件的可靠度,component reliability)即是结构(包括基础)各点(或各元件)的可靠度。可靠度一般用可靠指标表示,类似于确定性方法中安全系数的概念^[1]。因此,如果计算出结构各点的可靠指标,可以从可靠指标的等值线分布清楚地看出结构的最危险部位,甚至边坡的最危险滑动面^[29]。复杂结构的点可靠度,一般需通过随机有限元(或边界元等)才能获得。在随机因素的影响下,结构的实际响应(如位移、应力)一般不可能为正态分布,因而,可靠指标一般需通过迭代计算才能获得。至今国际上已提出了可靠指标的若干迭代计算方法^[30],如 JC 法、验证荷载法、几何法和优化算法等。其中,Hasofer 和 Lind 提出的可靠指标的优化算法由于具有收敛快、精度高等优点而被广泛采用。河海大学在可靠度的计算方法和利用随机有限元求解结构的可靠度方面做了大量的工作^[23,25,31],同时,为应用于大型实际工程,并在基于随机有限元的可靠度计算中进一步提高计算效率,还提出了位移 Taylor 展开技术^[23,24],以避免在可靠指标的迭代过程中刚度矩阵的反复分解,并论证了该法的适用性^[23]。研究结果表明,位移一阶 Taylor 展开技术使计算效率大为提高,其精度随着可靠指标绝对值的减小而提高。由于对实际工程人们往往关心的是可靠指标较小的单元,故该法有较大的实用性。

随着可靠度理论的进一步深入,人们发现构件或点可靠度的计算已不能满足实际需要。人们常常关心的是由众多构件组成的结构或连续体结构体系的可靠度。结构体系可靠度是可靠度理论中最为重要也最为复杂的内容之一。显然,按常规确定性的分析方法不易获得结构体系的安全性大小,我国 5 个部门共同制定的《工程结构可靠度设计统一标准》中明确提出:“当有条件时,工程结构应按结构体系进行可靠度分析。”结构体系可靠度的计算方法大体上有^[32]:Monte-Carlo 法、点估计法、响应面法和失效模式(失效路径)分析法等。由于前 3 种方法难以描述结构的失效机理,因而,失效模式分析法成为常用的一种分析方法^[33,34]。该法考虑到任一失效模式的发生都会导致结构系统的失效,而只有当失效模式中所有单元都发生失效时失效模式才会产生,因此,结构的失效系统是所有可能失效模式的并集,而失效模式是失效模式中失效单元(元件)的交集。因此,结构体系可靠度的计算通常分三步进行^[34]:(a)寻求结构的主要失效模式;(b)失效模式间相关性的计算;(c)求解体系可靠度。其中前两点是关键也是难点,第 3 点牵涉到串联系统可靠度的计算方

法^[35]通常可在完成第 1、2 步的基础上采用 Ditlevsen 提出的窄界限法.第 2 点实际上是以一个功能函数表征失效模式的问题,因为只要能以一个功能函数描述失效模式,则失效模式间的相关性也就可以很方便地求出.目前,在国际上,还基本局限于框架结构体系可靠度的研究,这是因为框架结构体系通常具有明确的失效模式(即失效机构),可以通过虚功原理获得机构的功能函数.相比之下,块体结构的体系可靠度问题要复杂得多,一般需借助随机有限元法.美国加州大学(伯克利分校)的 Der Kiureghian 指出:在这一研究领域,这仍是一个最富挑战性的课题.^[36]我国吴世伟等^[37,38]最早进行了尝试,提出了将 PWLEP 法(逐段线性-弹塑性法)与随机有限元相结合的方法.随后,考虑到失效单元之间也存在着相关性,河海大学通过进一步深入研究,提出了条件可靠指标的概念,并以条件可靠指标作为寻求主要失效模式的依据^[33].对于失效模式间的相关性问题,河海大学提出了单元失效事件的逐步等效线性化模型,构造一个基本随机变量的线性函数,以此作为失效模式的功能函数,从而较好地解决了以一个功能函数表征三维结构失效模式的问题^[39].对于弹塑性结构的体系可靠度问题,在利用弹塑性随机有限元寻求结构的失效模式时,为反映失效单元的初始塑性状态,河海大学进一步提出了设计验算点表征法及随机变量表征法^[34].

现今用于结构设计校核的可靠度计算方法往往不考虑时间因素,所得可靠度实际上是时不变可靠度.如果随机因素需以随机过程加以描述,则相应的可靠度问题转化为时变可靠度问题^[40].例如,考虑施工过程的大坝随机温度徐变应力场作用下的可靠度问题^[17,30].时变可靠度分为两种:一是疲劳可靠度;另一是首次超越可靠度.疲劳可靠度问题在水工问题中的一个主要方面是裂纹扩展的疲劳可靠度问题^[41].而结构仿真温度应力和地震响应的可靠度问题则应属后者.在后一问题中,由非平稳向量随机过程构成的非线性功能函数的首次超越可靠度问题是一个十分复杂的问题,但这一问题在实际工程中普遍存在,因为实际的随机过程一般不是平稳的(如地震荷载),另外用以描述材料强度的功能函数一般也不是线性的(如混凝土强度的四参数准则).但在这一方面,国际上还极少有人问津.为此,河海大学提出了随机过程首次超越概率的数值解法^[42],以数值计算手段克服数学处理上的困难.这一数值解法收敛快,效率高,可以方便地退化为平稳随机过程甚至随机变量非线性(包括线性)组合的问题,因而具有普遍的实用价值.这一研究成果也为在时域内研究结构的抗震可靠度奠定了基础.

2.4 非线性材料的随机力学问题

由于岩土材料等往往具有较强烈的非线性特点,有必要针对材料的非线性特性研究相应的随机力学分析方法.对于非线性材料结构的随机响应问题,较普遍的是采用随机有限元法^[4,5,43].在采用摄动法或偏微分随机有限元时,与线弹性问题相比,非线性问题的困难主要有 3 点^[25](a)非线性问题一般需通过分级加载,将非线性转化为逐段线性,在分级加载过程中,需完成均值和偏微分的计算,收敛性的判别由均值和偏微分的双重准则决定;(b)对于线弹性问题,由于强度参数对位移和应力没有影响,故不参加偏微分的计算,而对非线性问题,强度准则对位移、应力产生影响,弹塑性应力应变矩阵中包含应力项和强度参数,在偏微分计算中成为耦合问题;(c)利用随机有限元计算可靠度时,线弹性问题只需进行可靠指标的单一迭代计算,而对于非线性问题,在每级荷载增量内,位移、应力及其偏导数一般均需进行一次迭代计算(如采用初应力法等),计算可靠度时则需进行另一次迭代,且两次迭代互耦.双重迭代问题对方法的实用有较大影响.

目前,在国际上,非线性随机有限元的研究已成为人们十分关注的课题^[5].从实用角度来说,偏微分随机有限元法相对效率较高,且对于三维连续块体结构,其状态场一般来说是连续可微的.因此,河海大学采用偏微分法,提出了基于增量理论的三维弹塑性随机有限元法和相应的可靠度计算公式,分别将确定性有限元计算的变 K_p 子增量迭代法、BFGS 迭代法以及初应力法引入非线性随机有限元^[25,26].这不仅可以反映加载路径和荷载的随机分级问题,并使偏微分计算与确定性非线性有限元的迭代计算同步进行,且计算效率较高.同时,为进一步提高实用性,针对随机因素较多的情况,河海大学还提出了非线性随机有限元计算中的伴随向量法^[26].该法使计算工作量不随随机变量的增多而增加.所提出的方法业已成功应用于超大型地下洞室群的围岩稳定计算等实际问题.此外,河海大学还基于位移控制技术,提出了可考虑材料应变软化效应的非线性随机有限元计算方法,并将该法应用于边坡稳定的可靠度分析.研究结果表明,与不考虑破坏的线弹性结果相比,材料弹塑性(或应变软化)的效应使塑性区周围单元的可靠度有较大幅度的降低,但在离塑性区较远的位置,单元的可靠度反而略有提高.

2.5 随机动力问题

动力可靠度问题是可靠度理论中较为复杂的问题之一.尤其是在既考虑地震荷载的随机性又考虑结构材料参数的随机性时,问题将变得十分复杂.动力可靠度问题总体上可按频域分析法和时域分析法进行研究^[44].但在时域内的研究要比在频域内的研究复杂得多.朱位秋的研究表明^[44],在考虑结构材料的随机性时,如果在时域内简单地采用随机有限元法进行计算,在一个周期后结果将发散,且发散程度随着时间的增长变得越来越严重.对于多自由度的大型结构,在时域内分析计算结构随机动力响应的研究在国际上仍处于探索阶段,在我国已是“九五”攻关研究内容的一部分.河海大学历经多年的研究,基于三维随机有限元法,对结构的自振频率统计特性的计算方法进行了研究^[45].研究内容包括拱坝在静力荷载、地震荷载共同作用下的承载能力抗震可靠度.所提方法可以较有效地考虑结构抗力、弹模以及地震荷载的随机性,研究成果业已应用于拉西瓦和小湾拱坝的动力抗震可靠度分析.此外,还从实用角度出发,以《水工建筑物抗震设计规范》(SDJ10—78)为基础,利用随机有限元,借助全概率理论表示结构的可靠度,就规范中的拟静力法和动力荷载法提出了结构抗震可靠度的计算方法^[46].同时还对有缝坝的抗震可靠度问题进行了研究^[47].

3 结 语

工程随机力学和工程可靠性理论及其应用始终是一个较为热门的研究方向.在洪华生(Alfredo H. S. Ang)等国际著名专家的推动下,美国和日本等国家已兴起考虑投资风险和效益的基于全概率思想的高层建筑可靠度设计方法(cost-effective reliability design)的研究,并成功地应用于若干高楼大厦的设计.可以看出,与国外同行研究情况相比,我国尚有自己的研究特色,但还有许多工作需要加强,工程应用也相对较为落后,还有很长的路要走.我们只有抓紧时间,努力攀登,才有可能跟上世界发展的步子,更好地为国家建设服务.本文既是部分研究工作的总结,也是下一步研究工作的起点.全文之下篇将从另外5个研究方面进行讨论,并对认识上的几点分歧和今后研究方向提出笔者个人的看法.

参 考 文 献

- 1 吴世伟.结构可靠度分析.北京:交通出版社,1988.1~30
- 2 国家自然科学基金委员会.自然科学学科发展战略调研报告.水利学科.北京:科学出版社,1994.50~70
- 3 Ang A H-S, Tang W H. Probability concepts in engineering planning and design. New York: John Wiley & Sons, 1984. 30~90
- 4 Schueller G I. Structural reliability-recent advances. In: Schuller G I, eds. Int Conf on Structural Safety and Reliability. Now York: John and Wiley & Sons, 1997. 1~34
- 5 Schueller G I, et al. A state-of-the-art report on computational stochastic mechanics. Probabilistic Engineering Mechanics, 1997, 12(4): 197~321
- 6 Zhang X T. Proc of the first China-USA-Japan workshop on civil infrastructure system. Shanghai: Tongji Univ Press, 1998. 1~200
- 7 卓家寿,刘宁.计算力学与应用的若干动态与展望.河海大学学报,1996,24(计算力学专辑):1~9
- 8 赵国藩,曹居易,张宽权.工程结构可靠度.北京:水利电力出版社,1984.1~200
- 9 王光远,陈树勋.工程结构系统设计理论及应用.北京:国防工业出版社,1996.1~200
- 10 Vanmarcke E. Random fields: analysis and synthesis. Cambridge: MIT Press, 1983. 40~90
- 11 刘宁,刘光廷.混凝土结构的随机温度场及随机徐变应力.力学进展,1998,28(1):58~70
- 12 吴世伟,张思俊,余强.坝上游水位变化规律及统计量.见:吴世伟主编.结构安全度与可靠度分析论文集.南京:河海大学出版社,1988.51~59
- 13 刘宁,刘光廷.大体积混凝土结构温度场的随机有限元算法.清华大学学报,1996,36(1):41~47
- 14 Cawfield J D, Sitar N. First-order reliability analysis of groundwater flow. In: Spanos P, eds. Proc of Probabilistic Methods in Civil Engineering. New York: John Wiley & Sons, 1988. 144~147
- 15 刘俊生.尾矿坝随机渗流研究及其在可靠度分析中的应用:[学位论文].南京:河海大学,1995
- 16 包承纲,高大钊,张庆华.地基工程可靠度分析方法研究.武汉:武汉测绘科技大学出版社,1997.1~18
- 17 Peng X Q, Wu L Y, Liu G. Stochastic finite element method for reliability analysis with geometry randomness considered. J of Northwestern Polytechnical Univ, 1996, 14(1):116~120
- 18 徐日庆,龚晓南,王明祥.粘弹性本构模型的识别与变形预报.水利学报,1998(4):75~80

- 19 Ditlevsen O. Model uncertainty in structural reliability. *Structural Safety*, 1982, 1(1):73 ~ 86
- 20 Ronold K, Bjerager P. Model uncertainty representation in geotechnical reliability analysis. *J of Geotech Eng*, 1992, 118(3):363 ~ 376
- 21 刘宁, 吕泰仁. 随机有限元及其工程应用. *力学进展*, 1995, 25(1):114 ~ 126
- 22 Deodatis G. Weighted integral method-I: stochastic stiffness matrix. *J of Eng Mech*, 1991, 117(8):1851 ~ 1864
- 23 李同春, 吴世伟. 基于三维随机有限元的拱坝可靠度分析. 工程结构可靠性全国第二届学术交流会议论文集. 重庆: 重庆建筑工程学院, 1989. 114 ~ 125
- 24 刘宁, 李同春. 位移 Taylor 展开项对三维随机有限元可靠指标的影响. *河海大学学报*, 1994, 22(2):88 ~ 92
- 25 刘宁, 卓家寿. 基于三维弹塑性随机有限元的可靠度计算. *水利学报*, 1996(9):53 ~ 62
- 26 刘宁, 卓家寿. 三维弹塑性随机有限元迭代计算方法研究. *河海大学学报*, 1996, 24(1):1 ~ 8
- 27 Zhu W Q, Ren Y J, Wu W Q. Stochastic FEM based on local average of random vector fields. *J Eng Mech*, 1992, 118(3):496 ~ 511
- 28 刘宁. 三维可分向量随机场局部平均的三维随机有限元及可靠度计算. *水利学报*, 1995(6):75 ~ 82
- 29 刘宁, 李同春, 卓家寿. 节理岩体的三维随机有限元分析及可靠度计算. *岩石力学与工程学报*, 1995, 14(4):297 ~ 305
- 30 Liu P L, Der Kiuregian A. Optimization algorithms for structural reliability. *Structural Safety*, 1990, 9(3):161 ~ 177
- 31 吕泰仁, 吴世伟. 用几何法求构件的可靠指标. *河海大学学报*, 1998, 26(5):39 ~ 46
- 32 Fu G K, Moses F. Importance sampling in structural system reliability. In: Wen Y K, eds. *Probabilistic Methods Civil Eng.* New York: John Wiley & Sons, 1988. 340 ~ 343
- 33 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. *水利学报*, 1996(3):36 ~ 43
- 34 刘宁. 基于三维弹塑性随机有限元的结构体系可靠度计算. *工程力学*, 1995(11):443 ~ 448
- 35 刘宁. 结构体系可靠度计算方法述评. *河海科技进展*, 1993, 13(4):37 ~ 45
- 36 Der Kiuregian A, Li C C, Zhang Y. Recent development in stochastic finite elements. In: Der Kiuregian, eds. *Proc of 3rd Int Conf on Reliability & Optimization of Structural System.* New York: John Wiley & Sons, 1991. 19 ~ 38
- 37 吴世伟, 李同春. 重力坝最大可能失效模式初探. *水利学报*, 1996(4):36 ~ 44
- 38 吴世伟, 张思俊, 吕泰仁等. 拱坝的失效模式与可靠度. *河海大学学报*, 1992, 20(2):88 ~ 96
- 39 刘宁, 李同春, 卓家寿. 三维结构失效模式间相关性的研究. *河海大学学报*, 1994, 22(5):29 ~ 35
- 40 Madsen H O, Krenk S, Lind N C. *Methods of structural safety.* New York: Springer Verlag, 1986. 110 ~ 150
- 41 刘宁, 孟庆生, 吴世伟. 非平稳荷载下疲劳裂纹扩展的可靠度分析. *工程力学*, 1993(5):547 ~ 552
- 42 刘宁, 武清玺, 吕泰仁. 非平稳随机过程非线性组合的首次超越可靠度. *河海大学学报*, 1997, 25(5):1 ~ 6
- 43 Hisada T, Noguchi H. Development of a nonlinear stochastic FEM and its application. In: Shinozuka M, eds. *5th Int Conf on Structural Safety and Reliability.* New York: John Wiley & Sons, 1989. 1097 ~ 1104
- 44 朱位秋. *随机振动.* 北京: 科学出版社, 1992. 200 ~ 250
- 45 何慧莉. 结构自振频率的统计特性及拱坝的动力可靠度:[学位论文]. 南京: 河海大学, 1994
- 46 孙长龙. 混凝土重力坝随机有限元动力可靠度分析:[学位论文]. 南京: 河海大学, 1993
- 47 杜成斌, 赵光恒. 带横缝拱坝的抗震可靠度计算. *河海大学学报*, 1995, 23(2):151 ~ 157

Stochastic Mechanics and Reliability Theory in Engineering : Part-1

Liu Ning

(College of Civil Engineering , Hohai Univ. , Nanjing 210098)

Zhen Jianqing

(Zhejiang Wenzhou Water Resource and Water Power Survey and Design Research Institute , Wenzhou 325000)

Abstract A brief review is given of international research on stochastic mechanics and reliability theory. Based on some practical engineering problems, uncertainties are described and classified into several aspects. According to the research performed by Hohai University and some applications in engineering practices, recent developments of stochastic finite element methods, random field discretization, component reliability, system reliability, time-dependent reliability, nonlinear stochastic mechanics as well as stochastic dynamics are systematically introduced.

Key words stochastic mechanics; structural reliability; probability; stochastic finite element method