

随机土动力学概论

吴再光 韩国城 林 皋 著



大连理工大学出版社

随机土动力学概论

吴再光 韩国城 林 皋 著

大连理工大学出版社

(辽)新登字 16 号

内 容 提 要

本书系统地介绍了土动力学中应用概率统计、随机振动理论进行土工建筑物地震动力可靠度分析的最新研究成果。包括平稳、非平稳随机地震反应分析、砂土地震液化、土石坝永久变形、软土残余应变、粘土动力裂缝等不同破坏机制的概率可靠度评价,以及最新发展起来的随机有限元法在土工建筑物地震反应分析中的应用。

本书注重基本概念、基本理论和求解方法的阐述,更注重新方法在实际工程中的应用。

本书可作为研究生教材或参考书,也可供工程技术人员、应用科学研究人员参考。特别是土木工程建筑设计正处于由定值安全系数法向概率可靠度设计的转轨时期,本书可以帮助从事岩土地震工程的读者较快地熟悉概率可靠度设计的基本思想和方法。

随机土动力学概论

Suiji Tudonglixue Gailun

吴再光 韩国城 林 皋 著

大连理工大学出版社出版发行 (邮政编码: 116024)

大连理工大学印刷厂印刷

开本: 850×1168 1/32 印张: 7.25 字数: 187千字

1992年6月第1版 1992年6月第1次印刷

印数: 0001—1000册

责任编辑: 水舟 封面设计: 姜严军

责任校对: 玉洁

ISBN 7-5611-0671-8/TU·11

定价: 2.50元

序 言

本书所阐述的土工建筑物和地基在地震作用下的动力响应和抗震稳定性是岩土地震工程学科研究的一项重要内容。土工建筑物在许多工程中获得广泛应用，大地震中不少工程建筑物的震害都是由地基的失稳所引起的，因此，土工建筑物和地基的抗震研究和水利水电、石油、港口、桥梁、铁路和公路等工程建设密切相关。

我国是一个多地震的国家，全国约 60% 的地区属于 6 度以上的抗震设防区。从我国当前的地震形势来看，本世纪的最后 10 年，一个新的地震活跃期即将到来，而且已经揭开序幕。无论从地震活动的强度和频度来看，均较过去有明显增加，预计将有 7 级以上强震连续发生的可能性，这使土工建筑物和地基的抗震研究更具有迫切的现实意义。

可靠度分析将工程建筑物的安全评价提高到一个新的水平，并成为工程建筑物设计的一个重要发展方向。

本书应用概率统计和随机振动理论从动力可靠度的角度来研究土工建筑物和地基的抗震稳定性。同时本书的作者还注意到，从岩土地震工程的发展趋势来看，已逐渐从强度分析转向变形分析，在安全评价方面则从整体稳定转向容许变形检验，在设计方面则从保障建筑物的稳定和人的生命安全到同时考虑建筑物震后便于修复和发挥运用功能。可以预计，土工建筑物和地基的变形研究将愈来愈活跃，成为一个主要方向。本书在内容的选择和安排方面也兼顾到了这一动向。本书力求反映岩土地震工程在土工建筑物和地基抗震研究方面的最新成果和发展动向。

岩土地震工程形成学科并得到发展是近二十多年来的事。这

是因为岩土介质，特别是土壤的力学和工程性质十分复杂，具有强非线性，其动力特性是剪应变的函数并且随时间而变化。岩土动力性质的研究，只是在近年来由于弹塑性力学、两相介质力学、计算技术、数值分析方法和测试技术所取得的巨大进步，才为岩土地震工程的发展创造了良好的条件。土工建筑物和地基的抗震研究，特别是其可靠度分析作为岩土地震工程这一新学科和发展中学科的一部分，含有许多不成熟和不完善的地方是可以想像到的。其中的部分内容应用于实际工程设计也还有一定的距离。本书的目的在于使读者对岩土地震工程中所含的这部分内容有一个比较系统的基本了解，对其当前所取得的进展以及将来的发展动向初步有所掌握，以便为岩土地震工程在我国的发展贡献力量。

本书若有不妥之处诚恳地欢迎读者提出宝贵意见。

在本书的编写过程中，吴再光同志作出了很大的努力，有很多内容反映了他多年研究工作的心得和体会。

林 皋

1991 年底于大连理工大学

目 录

| | |
|-----------------------------|-------|
| 第一章 绪 论 | (1) |
| 第一节 工程建筑可靠度分析的必要性及发展现状 ... | (1) |
| 第二节 土动力学中进行概率可靠度分析的必要性 ... | (5) |
| 第三节 土动力学中应用概率分析方法的现状 | (8) |
| 第二章 概率、统计及随机振动基础 | (12) |
| 第一节 工程中的概率概念及基本理论 | (12) |
| 第二节 工程中常用的几种统计检验方法 | (21) |
| 第三节 随机振动基础知识 | (26) |
| 第三章 场地地震危险性分析 | (43) |
| 第一节 场地地震危险性分析的基本步骤 | (43) |
| 第二节 地震活动性分析 | (47) |
| 第三节 地震危险性分析 | (50) |
| 第四节 地震动持续时间的估计 | (59) |
| 第五节 反应谱与功率谱的转换 | (62) |
| 第六节 人造地震波及土层反应分析 | (65) |
| 第四章 平稳随机地震反应分析 | (73) |
| 第一节 土层随机地震反应分析概况 | (73) |
| 第二节 单层土随机地震反应分析 | (75) |
| 第三节 多层土随机地震反应分析 | (83) |
| 第四节 二维复杂土层随机地震反应分析 | (87) |
| 第五节 土石坝模型平稳随机振动试验及数值计算 ... | (98) |
| 第六节 土石坝地震加速度分布的统计分析 | (107) |
| 第五章 砂土地震液化概率分析 | (119) |
| 第一节 基于剪应力对比法的砂土液化概率分析 | (119) |

| | | |
|------|--------------------------------|-------|
| 第二节 | 基于危险性分析的砂土液化概率计算····· | (122) |
| 第三节 | 基于累积损伤理论的液化概率分析····· | (124) |
| 第四节 | 考虑砂土液化抗力随机性的概率分析····· | (133) |
| 第六章 | 土工建筑物地震永久变形概率分析····· | (142) |
| 第一节 | 土石坝滑动体地震永久变形概率分析····· | (142) |
| 第二节 | 软土岸坡、海堤整体软化变形分析····· | (152) |
| 第七章 | 随机地震作用下土坝裂缝的概率分析····· | (159) |
| 第一节 | 评价土坝地震裂缝的一条可能的途径····· | (159) |
| 第二节 | 土石坝地震裂缝的初步估计····· | (161) |
| 第八章 | 非平稳随机地震反应分析····· | (164) |
| 第一节 | 线弹性结构非平稳反应分析的时域模态综合法 ····· | (164) |
| 第二节 | 平稳反应计算的简化方法····· | (168) |
| 第三节 | 土石坝非平稳反应计算····· | (171) |
| 第四节 | 土层非平稳有效应力随机地震反应分析····· | (177) |
| 第九章 | 考虑土参数随机性的土工建筑物地震反应分析 ····· | (183) |
| 第一节 | 随机场的基本概念····· | (183) |
| 第二节 | 水平土层物理力学特性的随机场描述····· | (185) |
| 第三节 | 随机有限元法简介····· | (187) |
| 第四节 | 随机有限元法在水平土层地震反应分析中的应用 ····· | (189) |
| 第五节 | 土石坝地震永久位移的随机有限元分析····· | (198) |
| 第十章 | 总结与展望····· | (202) |
| 参考文献 | ····· | (205) |
| 附录 | ····· | (218) |

第一章 绪 论

第一节 工程建筑可靠度分析的 必要性及发展现状

工程建筑设计的基本宗旨是要保证建筑物在一定的使用期内能安全地抵抗外荷的作用，正常运行，并满足经济、合理的要求。在工程设计中不可避免地会涉及到大量的不确定性因素，如几何特征、材料特性、荷载效应、破坏机理以及设计理论的不完善和人为因素等等。这些不定性按其成因大致可分为四类：物理不定性、统计不定性、模型不定性和人为过失不定性。而所谓设计，就是在不确定性的条件下，按照已知限定条件（使用效率、工期、费用等）对建筑物作出最优决策，在安全与经济的矛盾中寻求折衷方案。

长期以来，工程设计人员在设计中有意识或无意识地都考虑了上述不确定性因素的影响，广泛应用的安全系数法就是最好的佐证。安全系数 F_s 可狭义地理解为结构抗力 R 与作用在结构上的外力 S 之比，即 $F_s=R/S$ 。实际上，无论是抗力 R 还是外力 S ，本身就受到各种不确定因素的影响，而由于主观和客观条件的限制，设计人员往往很难详细地去分析清楚这些不确定的因素及其影响程度。为了完成设计，采取了安全系数法。这种方法凭大量工程经验，结合适当的理论分析，选择某一系数以达到用起来方便又能较好地弥合设计结果与实际现象之间差别。安全系数法避开对众多不确定性因素的繁杂分析而本质上又适当考虑了若干不确定性因素的影响，针对不同工程设计中的不确定性程度选择

不同的安全系数，这无疑是在建筑物设计中的一大进步。

安全系数法的关键点是要确定以多大的 F_s 值才能大体上满足工程上的要求，才能基本上弥合设计结果与实际现象之间的差别。对土坡圆弧滑动问题，如果知道采用 $F_s=1.2$ 可以大体上满足工程上的要求，就取 $F_s=1.2$ ；对于基础承载力问题，如果安全系数取 3.0 可以的话，就取 3.0；而且，如果采用 $F_s=10.0$ 代替更加简化的设计法，在工程上能得到满意的结果，那么也可以取 $F_s=10.0$ 。总之， $F_s=1.2$ 并不意味着有 120% 的安全， $F_s=3.0$ 也绝不是 3 倍的安全，同样， $F_s=10.0$ 不可能是 10 倍的安全。也就是说，安全系数大小本身往往并不能定量表示安全富裕的程度。当然，对同一建筑采用同样的方法设计，安全系数越大，安全程度也越高。但一般而论，对不同建筑物采用不同的方法设计，用安全系数来衡量相互间安全程度的高低是比较困难的，这也是安全系数法的主要缺点所在。

比如在某一地点，修一座混凝土重力坝或修一座土坝都能达到同一目的和起相同的作用。如修重力坝，在坝底面与基岩面之间抗滑验算时，设计安全系数可估计为 4.0；而修建土坝时，对于坝体内部的滑动，安全系数只估计为 1.2。这时能说安全系数为 4.0 的混凝土坝的安全程度比安全系数为 1.2 的土坝高 3 倍以上吗？从另一角度，常常对两种建筑物安全系数取值相等，但经较核后发现其安全程度并不一样。有时甚至对安全系数取值不同的建筑物，安全系数大者，安全程度反而低。

上述事实说明，对基于大量不确定因素影响之下的工程建筑设计，仅凭一个笼统的安全系数很难定量地评价建筑物的安全程度，也无法比较采用不同设计方法取不同的安全系数时建筑物是否具有相同的安全储备。随着现代科学技术的高速发展，各种设施和建筑物的日臻复杂化及大型化，人们对建筑物的设计提出了更高的要求，需要一种定量地合理地测定其安全程度的方法，由此导致和推动了可靠度理论和方法在工程建筑设计中的应用。

可靠度分析方法力图定量地去考虑工程中的各种不确定性，在此基础上以结构失效的概率作为评价其安全程度的统一度量标准。工程建筑可靠度分析的任务就是要设法计算出各建筑物失效的概率，并使该失效概率限制在合理的范围之内。由于可靠度设计法能对各种不确定因素分别进行某种形式的定量考虑，并有一个统一的度量工程建筑安全程度的标准，这就有可能使工程建筑物设计得更为安全和经济。正是基于这种原因，使可靠度分析方法显示出较强的生命力。

目前在我国，可靠度理论及方法在上部结构的设计中得到较广泛的应用，在下部地基及岩土工程中发展相对较慢。1985年完成的《建筑结构设计统一标准》^[1]，标志着我国可靠度设计方法已在结构设计中进入实用阶段，紧接着各专业部门也都先后完成和正在编制《港口工程结构可靠度设计统一标准》、《铁道工程结构可靠度设计统一标准》、《水工结构可靠度设计统一标准》和《公路工程结构可靠度设计统一标准》等，并且各专业部门正在联合起来编制通用的《工程结构可靠度设计统一标准》。这一系列完全崭新规范的通过和实施，将使我国结构设计方法进入一个新的时期。目前可以说正处在转轨阶段。为完成这一转轨，国内已出版了若干专著^[2-5]和大量的学术论文，召开了多次大型会议。总的看来，结构可靠度设计之风已深入到各建筑设计行业，转轨已势在必行。

国际上结构可靠度设计发展也相当迅速，自1971年成立国际结构安全度联合委员会以来，已召开了5届结构安全度国际会议，出版了专门的《结构安全度》国际杂志，通过广泛的国际合作，组织编制了《结构统一标准规范的国际体系》，作为各国进行结构可靠性理论和应用研究的指导性文件。国际标准化组织也先后于1973年和1986年提出了《结构可靠性总原则》，为可靠度分析在工程中的应用和推广起到了良好的作用。

相对于上部结构可靠度分析而言，岩土工程可靠度研究是一

个比较困难的问题，其发展落后于结构工程可靠度的发展。主要原因可以归结为两点：一是岩土工程研究的对象——土和岩石——是大自然的产物，其性质远比人工可以控制的钢材、混凝土等复杂，变异性大，且难以捉摸，它既是空间又是时间的函数^[6]；二是岩土工程的规模和尺寸比一般结构工程巨大，无论是边界条件还是受力、传力的机理、失效的模式等都比结构工程复杂得多。正是这些现实的客观的原因阻碍了岩土工程中可靠度理论的应用和发展^[7]。

尽管如此，在上部结构可靠度分析的推动和促进之下，岩土工程可靠度也有了长足的进展。国外从 60 年代末开始，以美国伊利诺大学的洪华生^[8]、麻省理工学院的 Whitman^[9]、Vanmarcke^[10] 和俄亥俄州立大学的吴天行^[11] 等教授为代表，广泛地开展了岩土工程可靠度分析。随后，澳大利亚、香港、日本、西欧也相继兴起热潮，在诸如海洋平台地基、边坡稳定、挡土墙设计、桩基承载力等问题上引入可靠度分析理论和方法，并取得了成功。在此期间，国际上工程界和学术界尽管存在一些不同的看法，但岩土可靠度的研究方兴未艾，研究人数和所涉及的领域日益扩大，论文数量迅速增加，有关的学术会议相继召开。我国关于岩土可靠度的研究始于 80 年代初^[12]，研究内容涉及地基承载力^[13]、土坡稳定^[14]、地基沉降^[15]和桩基^[16]等各个方面，取得了相当可观的成果，并有专著出版^[17]。

总的来看，无论国内还是国际，对工程建筑设计逐渐由定值安全系数法转向概率可靠度设计已是大势所趋，尽管在可靠度分析重要基础之一的统计数据的积累上可能还会面临许多困难，但它毕竟代表了今后的发展方向，或早或迟总会转到可靠度设计的轨道上来，这点必须有足够的认识。

第二节 土动力学中进行概率可靠度分析的必要性

地基及土工建筑物在地震作用下的动力响应和抗震稳定问题是土动力学中研究比较集中的问题。以往的研究也主要采用确定性的安全系数法,即选择某一确定性的地震波或反应谱作为输入,动力分析求解建筑物各点的响应时程或峰值反应,然后按照某种稳定分析方法(如圆弧滑动、抗液化失稳等)计算稳定安全系数,作出必然安全或肯定失稳的确定性结论。

实际上,首先作为引起土工建筑物动力破坏的外荷载——地震动,无论是发生的地点、时间还是发生的强度、传播途径等都存在严重的不确定性,无法精确预测,也不可重复。日本坝高 37 米的山王海心墙土坝^[18],在坝肩基岩上同一测点连续五次测得地震加速度记录,结果发现五次地震记录的峰值、持续时间和频谱特性都不同。我国海城、唐山地震时,在盘龙山地震台山腰基岩测站连续测得 11 次地震的 20 条水平地震加速度记录,经过谱分析得到的 20 条拟速度谱曲线相当杂乱,谱值大小相差几十倍^[19]。类似的事例还可举出许多,这说明即使是“基岩”地震动,由于受地震发生在时、空、强度及传播介质等方面的随机性的影响,本质上也具有不可精确预测的随机性。

土是一种强非线性材料,土工建筑物的地震破坏一般又具有累积损伤的特性,因此,即便按目前控制输入地震波“三要素”的方法来选择若干条具有相同最大峰值、主振频率以及持续时间的不同波形地震波,计算同一土工建筑物的动力响应,其结果也是相当离散的。我国学者汪闻韶^[20]利用 FLUSH 程序,对鲁布格心墙堆石坝进行了大量动力反应计算,输入地震波选择了三条真实地震记录,分别调整最大加速度至 4.0m/s^2 、 2.0m/s^2 、 1.0m/s^2 ,共进行了 21 种组合的计算。结果表明,对不同地震波,尽管峰值

相同，但坝体反应峰值相差可达 1 倍多；我们利用人造地震波技术，产生 5 条符合同一功率谱的人工地震波，利用 QUAD4 程序计算了同一土石坝的地震反应，结果发现最大反应加速度相差也近 1 倍；对某一粉煤灰坝输入控制参数完全相同的两条地震波进行计算，得到的单元最大动剪应力相差 1.7 倍；对某海堤也进行了类似计算，得到的单元累积残余应变相差也超过 1 倍。

动力响应的不同预示着动力破坏的评价也将完全不同。美国学者 Franklin 和 Chang^[21]于 1977 年应用 Newmark 提出的滑块永久位移计算模型，计算了 9 条真实地震记录激励下斜面上—刚性滑块产生的永久滑移。这 9 条地震记录都是 1971 年圣费尔南多地震时距震中 28.6 至 40km 范围内的一般土层场地上记录到的。他们将其归一化，都调整到具有相同的最大加速度或最大速度、主振频率及强震持续时间。按一般说法，调整后的 9 条记录应该是“等效”的。但完全出乎预料，9 条“等效”的地震波计算的同一滑块永久位移却根本不等效，大小之差超过 4 倍。Makdisi 和 Seed^[22]采用类似的方法对真实土石坝地震永久位移进行了计算，结果离散性更大，同一震级不同波形的地震波引起的土石坝永久位移相差可达 10 倍以上。我们对海堤地震软化残余变形的计算表明，相同控制参数的不同地震波造成海堤的沉降变形量相差也超过 1 倍。

现有的大量试验成果已经证明，砂土液化与地震动的波形密切相关。日本学者石原研尔等^[23]较早地研究了地震动的随机性对砂土液化的影响，指出冲击型波和振动型波将引起完全不同的孔隙水压力，因而液化状况也是不同的。美国的沈智刚等^[24]研究了动荷载的脉冲位置和顺序对砂土液化势的影响，明确指出影响液化势的不仅是脉冲的幅值，而且与脉冲的先后次序密切相关。我国学者谢定义等^[25]进一步研究了不规则动荷载脉冲对砂土液化势的影响，全面地总结了不规则波的大波效应、首波效应、连波效应、缓冲效应、强化效应及加速效应等。大量的计算分析也表明，

对相同控制参数的地震波液化计算得出的结论也完全不同。如我们所进行的粉煤灰坝液化分析，两条输入地震波，一条将引起坝体较严重的液化溜坡，而另一条却未使坝体出现一个液化单元。

除了地震波的随机性将引起土工建筑动力响应和动力评价的不确定性之外，土料参数本身严重的离散性也是造成上述评价不确定性的另一重要原因。土料作为天然材料，其物理力学特性除了本身固有的变异性，在勘探、取样、试验、统计分析等一系列环节中还会引入相当多的人为因素导致的变异性。现有资料表明，土料无论是密度、含水量、静模量、动模量、动阻尼比还是静强度、动强度、抗液化能力等，都显示出较强的离散性，试验数据在相当大的范围内变动^[26-27]。Martin^[28]、Anderson^[29]、Romo^[30]各自计算了土石坝输入唯一的一条地震波时的地震响应。分析中重点考虑了土料最大动剪模的变异性 and 剪模、阻尼比与剪应变幅依赖关系曲线的不确定性。结果发现确定性地震波输入下，由于土参数的变异性导致动力反应形成相当宽一条离散带，动剪应力最大响应相差 1 倍多，加速度响应相差近 2 倍。可见土参数变异性引起的动力反应离散并不亚于地震波随机性的影响。

以上事例说明，在土动力学中对土工建筑物进行抗震设计时，仅靠最大峰值、主振频率、持续时间等基本要素来选择某一条或某几条（土石坝一般要选 4 条^[31]）确定性地震波是不够的。一方面在波形选择和土参数确定上存在较大的任意性；另一方面，即使选定了波形和土参数，动力稳定分析得出的安全系数也无法定量说明到底设计的建筑物有多大的安全储备。因此，建立以计算失效概率为最终目的的动力可靠度分析方法是非常必要的。以往这方面之所以发展缓慢，主要原因大概有两点：一是对地震动随机性和土参数变异性的定量描述没有很好地解决，二是对大体积强非线性的土工建筑如何进行随机反应计算和动力可靠性评价没有很好解决。当然，与工程界一直沿用对其它荷载其它建筑采用确定性安全系数设计方法也有很大关系。近年来，随着场地地震

危险性分析方法的改进和发展, 随机振动、随机场、随机有限元等新理论新方法的引进和深化, 以及上部结构概率可靠度分析的逐步转轨, 土工建筑物中考虑地震荷载的随机性和土参数的变异性进行概率分析也有了新的进展, 一个新的分支学科——随机土动力学正在形成并迅速充实其内容。

第三节 土动力学中应用概率方法的现状

砂土地震液化是土动力学中应用概率统计方法研究较多的问题。1980年, Christian^[32]关于概率土动力学的发展现状报告中比较集中地介绍了这方面的研究现状。以往的研究大致分为如下四种途径: 一是针对 Seed 等^[33]提出的判别水平土层地震液化的简化方法进行概率分析, 即通过实验室单元体试验确定砂土抗液化强度 τ_p , 通过简化方法确定现场土层动荷载强度 τ_A , 从概率统计角度分析影响 τ_p 和 τ_A 的各种不确定因素, 建立相应的概型并按误差传递理论确定相应的统计参数, 然后进行 $\tau_A > \tau_p$ 的概率计算, 很容易就可得出液化失效的概率。这类方法, 如 Haldar 和 Tang^[34]的方法, Fardis 和 Veneziano^[35]的方法等。第二类方法从实际震害事例出发, 通过标贯试验确定现场土的液化抗力, 通过简化方法确定同一点的动荷载强度, 然后从历史地震中液化与不液化的实际记录, 按照多维统计方法使误差的全概率最小来作出最佳的液化判别分界线, 以便利用该分界线来对未来的场地地震液化作出最优判断, 有代表性的如 Yegian 和 Whitman^[36]的方法, Christian 和 Swiger^[37]的方法等。第三类方法将历史地震液化记录结合室内液化试验结果, 通过优化回归建立起场地液化指数与地震的震级和震中距的衰减关系, 引入地震危险性分析模型, 直接对某场地进行地震液化的危险性分析, 得出今后若干年内该场地可能发生地震液化的概率, 典型的工作当数 Yegian 和 Vitelli^[38]的研究。第四类方法则充分利用随机振动理论, 直接通过随机反应分析确定土层中某点的随机动荷载 τ_A , 而相应点砂土抗液化强度

τ_p 还是通过实验室单元体试验获得, 然后按累积损伤理论确定液化的危险性。首先发展这一方法的是 Donovan^[39], 在他的模型中, 土是线弹性体, 地震动为零均值平稳高斯过程。后来他又将这一方法应用到美国阿拉斯加输油管道铺设时涉及到的砂土地基液化问题的研究中^[40]。Faccioli^[41]继续改进和发展了这一方法, 但还是停留在线弹性土体基础之上。1983年, Chameau 和 Clough^[42]进一步考虑了土中孔隙水压力的非线性增长和土体抗液化强度的变异性, 严格按孔压随振次增长的非线性关系进行了液化概率分析。同年, Pires、文义归、洪华生^[43]引入结构分析中的等价线性化法处理土的非线性特性, 从能量耗损角度进行了孔隙水压力增长的概率分析, 计算模型比较复杂。

以上工作主要针对饱和砂土地基进行的研究。在土石坝等土工建筑物抗震设计中, 较早引入随机振动和可靠度理论的是 Singh 和 Khatua^[44]。1978年, 他们将土石坝作二维平面应变问题处理, 用等参有限元离散, 引入等价线性化法计算随机地震反应, 应用累积损伤模型计算液化概率, 地震动作为平稳过程考虑。1981年, Gazetas 等^[45]将他们建立的多自由度线性系统非平稳地震反应分析方法引入土石坝地震反应中, 探讨了土石坝非平稳地震反应问题及土石坝地震加速度分布问题, 但对土石坝采用的是简单的线弹性剪切梁模型。1982年, 他们又引入循环迭代过程^[46], 采用逐次逼近等价线性化来近似处理土的非线性特性, 迭代中的等价剪应变 γ_{eq} 取最大剪应变的 0.65 倍。同年, 他们又将剪切深土坝模型用二维平面应变等参有限元离散模型取代, 计算了线弹性三角形坝体非平稳随机地震反应^[47]。Gazetas 等的一系列文章主要是探讨土石坝随机地震反应问题, 而对土石坝地震动力稳定问题未作评价。1984年, Lin^[48]在第八届世界地震工程会议上介绍了他所做的土石坝地震永久变形的危险性分析, 比较完整地进行了随机地震反应分析和地震永久变形概率分析的全过程。分析也采用了剪切梁土坝模型, 用与 Gazetas 相同的循环迭代等价线性化来

处理土的非线性特性。1986年, Lin 和 Whitman^[40]详细介绍了该方法用于滑块永久变形分析的各个细节, 对前文中的一些公式进行了补充说明和验证。

总的说来, 目前在土动力学中将概率方法用于土工建筑物抗震分析方面已取得了不少成果, 但相对说来目前的分析模型还比较简单、片面。地基或坝体砂土液化问题中应用随机振动理论进行随机反应计算以确定土层中某点随机动荷载强度, 显然比用 Seed 的简化法估算更为合理, 但如何简便有效地计算随机反应, 这是需要深入考虑的问题。而在土石坝永久变形分析中, 考虑地震荷载的随机性和土料的非线性进行可靠度分析目前只是刚刚开始, 主要采用的是一维剪切梁土坝模型。这对大体积非均匀土石坝, 如果仅计算平均的动力反应, 采用剪切梁模型估算还基本可以接受, 若要考虑土石坝沿不同滑动面的滑移破坏, 采用整体的剪切梁模型而不考虑坝体局部的反应, 这样确实是过于粗糙了。如何较为详细、准确地计算土石坝随机地震反应进而建立永久变形的概率分析模型, 这也是有待解决的问题。对破坏的评价, 目前也仅针对饱和砂土液化和土石坝塑性永久滑移进行了概率分析。对常见的土坝地震裂缝、软土岸坡、海堤等地震软化残余变形等还未见进行概率分析的报导。对土参数本身严重的变异性, 除了少数研究者考虑了这个问题之外^[28-30, 42-43], 大量的研究几乎都回避了这个问题。最后, 现有的土工建筑物抗震概率分析对如何充分利用已有的场地地震危险性分析成果, 进行动力稳定的全概率分析, 也是一项尚未很好解决的问题。

* * * * *

本书针对上述存在的问题, 力图介绍一些土动力学中应用概率方法的最新研究成果。由于我们近年来曾投入较多的力量进行随机土动力学中若干问题的研究, 因此, 本书主要以我们自己的