

岩土工程国家重点学科专著系列

NATIONAL KEY SUBJECT GEOTECHNICAL
ENGINEERING MONOGRAPH SERIES

地震危险性分析研究

高玉峰 张 健 著



科学出版社

www.sciencep.com

岩土工程国家重点学科专著系列

地震危险性分析研究

高玉峰 张 健 著

科学出版社

北京

内 容 简 介

本书是作者在从事地震危险性分析方面已取得的研究成果的基础上撰写而成。全书共分六章,包括绪论、地震危险性概率分析、人造地震动技术、一维土层粘弹性地震反应解析解、剪切波速的不确定性对土层地震反应的影响、液化区分布范围和液化区残余强度对地面大位移的影响。

本书可供从事岩土工程勘察、设计和科研的科技人员参考,也可作为高等院校岩土工程、防灾减灾工程及防护工程专业研究生的参考教材。

图书在版编目(CIP)数据

地震危险性分析研究/高玉峰,张健著. —北京:科学出版社,2007
(岩土工程国家重点学科专著系列)

ISBN 978-7-03-018895-3

I. 地… II. ①高…②张… III. 地震—研究 IV. P315

中国版本图书馆CIP数据核字(2007)第059628号

责任编辑:童安齐 / 责任校对:赵 燕

责任印制:吕春珉 / 封面设计:耕者设计工作室

科学出版社出版

北京东黄城根北街16号

邮政编码:100717

<http://www.sciencep.com>

新蕾印刷厂印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2007年5月第一版 开本:B5(720×1000)

2007年5月第一次印刷 印张:10 1/2

印数:1—2 000 字数:200 000

定价:35.00元

(如有印装质量问题,我社负责调换<新欣>)

销售部电话 010-62136131 编辑部电话 010-62137026(BA08)

前 言

本书是作者在从事地震危险性分析方面已取得的研究成果的基础上撰写而成。主要内容包括:研究潜在震源区范围的不确定性对地震危险性分析结果的影响,并基于简化的地震模型提出了一种量化确定潜在震源区边界的方法;采用“借用法”建立中国东部中强地震区基岩地震动衰减关系;提出一种地震危险概率分析方法——逐点计算法。本书讨论了不同的反应谱计算方法对计算结果造成的影响,指出了目前在反应谱计算中最常采用的方法——线性积分方法的缺陷,并对人造地震动的谱拟合方法进行了探讨,针对“顽固点”的清除提出了两种解决方案,即遗传算法与小波变换。书中还针对非平稳过程的不可重复性,结合超越概率提出了一致危险性非平稳过程的概念,为非平稳过程的研究提供了一条新的思路;同时,针对地震动的概率一致危险性反应谱的谱拟合标准问题提出相应的一致危险性地震动的概念,并将其应用于人造地震动谱拟合中,得到了相应的一致危险性地震动。本书研究了在齐次边界条件和非齐次边界条件、单层地基在基岩任意输入地震作用下时间域内一维土层粘弹性地震反应完全解析解,分析了土层厚度、土层密度、土层剪切模量、土层阻尼比等模型参数对土层地震反应的影响。应用一维土层地震反应等效线性化解法,研究了剪切波速的不确定性对黏土层、沙土层工程抗震设计地基动力参数的影响,并通过大量合肥膨胀土现场剪切波速的测试,分析了合肥膨胀土剪切波速的统计特征。采用多重剪切机构塑性模型,考虑到液化后土体处于流动状态,其强度值降为残余强度,并应用该方法对某防洪堤进行地基液化后大变形数值模拟。此外,还研究了液化区分布范围、残余强度对地面大位移的影响。

本书第一章、第二章、第四章至第六章由高玉峰撰写,第三章由张健撰写。本书出版得到了江苏省青蓝工程和河海大学岩土工程国家重点学科资助,特此致谢!

由于作者水平所限,书中不足之处在所难免,恳请广大读者批评指正。

目 录

前言	
第一章 绪论	1
参考文献	6
第二章 地震危险性概率分析	9
2.1 地震危险性概率分析中不确定性因素及其影响	9
2.1.1 地震危险性概率分析方法简述	9
2.1.2 不确定性因素对地震危险性分析计算结果的影响	9
2.2 基于简化的地震模型量化确定潜在震源区边界	17
2.2.1 简化的地震模型	18
2.2.2 量化确定潜在震源区边界的方法	18
2.2.3 确定潜在震源区边界方法的应用说明	19
2.3 中国东部中强地震区地震动峰值加速度的衰减规律	21
2.3.1 地震烈度衰减规律	21
2.3.2 地震动峰值加速度衰减规律	24
2.4 地震危险性分析计算方法	26
2.4.1 逐点计算法的思路	27
2.4.2 程序设计的技术处理	31
2.4.3 举例说明	33
2.5 结论	34
参考文献	35
第三章 人造地震动技术	36
3.1 人造地震动反应谱的计算	36
3.2 反应谱的数值计算方法	40
3.2.1 卷积计算方法	41
3.2.2 傅里叶变换方法	41
3.2.3 直接积分方法(线性积分方法)	42
3.2.4 三种反应谱计算方法的计算比较	43
3.2.5 小结	48
3.3 遗传算法、小波变换在人造地震动谱拟合技术中的应用	48
3.3.1 引言	48

3.3.2	遗传算法在谱拟合中的应用	49
3.3.3	小波变换在谱拟合中的应用	55
3.3.4	遗传算法、小波变换应用的比较	73
3.3.5	小结	74
3.4	人造地震动谱拟合标准探讨	74
3.4.1	引言	74
3.4.2	问题的提出	75
3.4.3	一致危险性地震动与一致危险性非平稳过程的概念提出	76
3.4.4	一致危险性地震动概念在人造地震动技术中的应用	80
3.4.5	小结	92
	参考文献	92
第四章	一维土层粘弹性地震反应解析解	98
4.1	单层地基一维土层粘弹性地震反应解析解	98
4.1.1	齐次边界条件地震反应解析解	98
4.1.2	非齐次边界条件地震反应解析解	104
4.2	模型参数对工程抗震设计地基动力参数的影响	109
4.2.1	土层厚度对工程抗震设计地基动力参数的影响	109
4.2.2	密度对工程抗震设计地基动力参数的影响	111
4.2.3	剪切模量对工程抗震设计地基动力参数的影响	112
4.2.4	阻尼比对工程抗震设计地基动力参数的影响	114
4.3	结论	115
	参考文献	116
第五章	剪切波速的不确定性对土层地震反应的影响	117
5.1	剪切波速不确定性对黏土层地震反应的影响	117
5.2	剪切波速不确定性对砂土层地震反应的影响	124
5.3	合肥膨胀土剪切波速的统计特征	130
5.3.1	引言	130
5.3.2	现场土层剪切波速测试	131
5.3.3	土层剪切波速的统计分析	134
5.4	结论	138
	参考文献	139
第六章	液化区分布范围和液化区残余强度对地面大位移的影响	140
6.1	概述	140
6.2	数值计算方法	141
6.2.1	多重剪切机构塑性模型	141

6.2.2	动力有效应力计算方法	141
6.2.3	液化后变形的计算方法	143
6.2.4	计算结果与震害实测结果对比	144
6.3	晋江防洪堤地震液化大变形数值模拟	144
6.3.1	工程地质概况	144
6.3.2	单元划分及计算参数	145
6.3.3	计算结果	148
6.4	液化区分布范围对地面大位移的影响	148
6.4.1	大面积整体液化情况	148
6.4.2	局部液化情况	151
6.4.3	小结	153
6.5	液化区残余强度对地面大位移的影响	153
6.5.1	大面积整体液化情况	153
6.5.2	局部液化情况	155
6.5.3	小结	157
6.6	结论	157
	参考文献	158

第一章 绪 论

我国是一个多地震的国家,地震频繁而强烈。在 20 世纪内,震级等于或大于 8 级的大地震已经发生 9 次之多,近年的大地震如 1976 年唐山 7.8 级地震,死亡达 24 万余人,强震区内的房屋、工业厂房和设备、城市建设、交通运输、水电设施等都受到极其严重的破坏。为了减轻地震灾害,必须大力进行工程抗震工作。任何建筑物均建在地基之上,地震一方面对地基直接造成破坏,另一方面通过地基传到上部结构,因而如何科学地确定工程抗震设计地基动力参数是整个抗震工作的基础。目前,世界上除极少数国家仍采用地震烈度作为工程抗震设计参数外,绝大多数国家采用地震动参数(峰值、反应谱、持时)作为工程抗震设计参数。地震烈度不是一个物理量,只是一个宏观的、综合的、粗略的等级,在抗震设计的使用中存在许多矛盾^[1,2]。为顺应科学发展的潮流,以及与国际接轨,我国编制的地震区划图开始采用以地震动参数作为工程抗震设计参数。当地基是岩石时,采用地震危险性分析可确定工程抗震设计参数;当地基是土层时,可通过土层地震反应分析确定工程抗震设计参数^[3]。

美国学者 Cornell 于 1968 年首先提出地震危险性分析的点源模型,该模型认为地震发生是一种随机事件,即未来地震发生的时间、地点、强度都是不确定的^[4],点源模型在后来的研究工作中得到了广泛的承认和应用,并在实践中不断得到发展。Kiureghian 等针对点源模型不能准确反应构造地震能量释放特征的缺点,提出了断层破裂模型^[5]。点源模型和断层破裂模型是采用概率方法进行地震危险性分析的两个主要模型,近 30 年来对这两个基本模型提出了不少改进意见,主要有 Savy 的非齐次泊松模型^[6]、Patwardhan 等的半马尔可夫过程模型^[7]。王阜^[8]为工程地震危险性分析提出一种考虑地震发生空间不均匀性的概率模型,即采用伯努利试验模型描述了在一定震源区内地震发生位置的不确定性,并利用贝叶斯方法将观测数据与专家的主观判断相结合,给出了地震发生概率的均衡估计,同时也给出了综合专家主观意见的方法和计算场地地震烈度超越概率的方法,从而为在工程地震危险性分析中充分反映地震地质学家和地球物理学家关于地震中长期地震预报的意见提供了一种定量的方法。沈建文等于 1989 年提出了经验点椭圆模型^[9],该模型以一系列长轴具若干优势取向的同心同轴椭圆描述影响场,提出对多数地区的等震线略具狭长的形状。经验点椭圆模型可以减少点源模型和断层破裂模型的系统偏差。章在塘和陈达生于 1982 年首先在二滩水电站坝区的地震危险评价中引入地震危险性分析方法^[10],此后该方法在我国得到广泛应用。潜在震源区

边界的确定是整个地震危险性概率分析的基础,其可靠程度有赖于地震地质学、地震学、地球物理学等学科的相互渗透。以往,在确定潜在震源区边界时,常是根据发震断层的参数及特征,结合其历史地震活动情况,沿发震断层线分别向两侧扩展5~15km以确定潜在震源区边界^[11]。胡银磊等于1996年通过对我国大陆地震($M_s \geq 6.0$)震中与其发震断层距离的统计与分析,认为该距离的分布基本上符合正态分布特征,经拟合计算得到我国东部和西部地区不同类型断层上不同震级档的地震震中距离分布的期望值和方差,并根据正态分布随机变量的区间估计方法确定潜在震源区边界^[12]。地震动衰减规律目前大都是根据历史地震数据总结出来的经验关系,所采用的总结方法是回归分析方法。由于地震资料和科学发展水平的限制,地震危险性分析不可避免地存在不确定性。对于建立在基岩上的高层建筑或其他重要工程,通过时程反应分析进行地震变形验算,需要提供基岩地震动时程。对此有两种方法:第一种是选用天然地震记录;第二种是人工模拟地震加速度时程曲线。理论上讲第一种方法较好,但实际上本地区往往缺乏资料,需要借鉴其他地区的天然地震记录,而第二种方法得到了广泛应用。

自Housner^[13]首先用随机脉冲叠加模拟地震动加速度时程以来,人工合成地震动已成为工程抗震一个重要的研究领域。在很多模型中,三角级数叠加的方法在工程实际中得到了广泛应用。与此同时,反应谱拟合技术也随着工程上的需要而迅速发展。胡聿贤等^[14]提出了在时域、频域内综合进行的谱的拟合技术;在幅值调整技术中,区分了各分量对最大反应贡献的正负,从而排除了正负反应调整相互抵消的情况,加快了收敛速度;在相位谱调整技术中,一方面是可以增加调整的手段,以加快收敛速度,另一方面调整相位对频率分量贡献使频率分量调整的效果越来越大,而不是逐渐减弱,从而又大大加快了收敛速度;计算分析表明,在对控制点左右的频带内频率分量幅值进行调整时,除区分其反应的符号外,还要看对反应的敏感大小,从而对贡献大的分量进行调整,这样还可以减小对其他点的影响,即在进行相位调整时,只调整与控制点对应的分量的相位,就可得到令人满意的效果,避免了大范围调整而造成对其他控制点的不良影响。另外,对于合理的反应谱,高频段收敛情况比低频段的好,持时长的时程比持时短的时程收敛情况好。朱昱等^[15]通过对地震加速度记录相位差谱的计算分析,认为强震加速度时程的相位差分布符合对数正态分布,用该分布产生的随机相角在合成人造地震动时程时并不需要叠加强度包络函数,所得人造地震动与实际记录十分相近,从而为合成频率含量和强度两者均为非稳态的人造地震动提供了一个实用性较强的方法,最终将对数正态分布相位差谱与正态分布相位差谱生成的人造地震动分别与实际地震记录进行比较,结果表明,用对数正态分布相位差谱合成的人造地震动与实际地震动吻合得更好。刘鹏程等^[16]将经验格林函数和人造地震动反应谱拟合技术有机地结合起来,利用已有的场地附近的小震记录合成可能发生的大震地面运动,以此作为人造地

震动的初始值;通过反复调整初始加速度的傅里叶幅值谱来拟合给定的目标反应谱,以得到满足精度要求的人造地震加速度时程,这样可以考虑地震环境和局部场地对地震动的影响,所合成的地震加速度时程具有时间强度和频度含量的非平稳特征,并且也不需要人为规定强度包线。金星等^[17]根据群速度与相速度的关系,阐明了相位差谱这一综合物理量的含义,讨论了它与等效群速度的联系,即假定地震加速度可由强度包线乘以均值为零的平稳随机过程构成,从理论上论证了地震动强度包线函数与相位差谱的频数分布函数成正变关系,并确立了地震动相位谱和相位差谱的定量关系,提出了相位谱与相位谱主值的本质差别,说明了地震动的相位信息是构成地震动强度和频率非平稳特征的主要因素,从而在改进量度地震动相位谱方法的基础上,从理论上阐明了在工程上感兴趣的地震波宽频带内地震动相位谱和幅值谱一样具有规律性。谢礼立等^[18]研究了地震动持时特征,提出了新的地震动持续时间定义。

场地条件对震害和地震动的影响是很大的,国内外多次地震的震害调查资料表明地震震害异常是经常发生的。例如,1962年广东河源地震时,珠江沿岸厚淤积土和人工填土上的建筑物震害比市区东北部第三纪丘陵地带的建筑物震害严重。1976年龙陵地震时,盆地内厚200多米的新生代地层上,房屋倒塌率一般为50%左右,而盆地周围花岗岩地基上房屋倒塌率不超过30%。1976年唐山地震时,北京原通县西集地区出现了液化,但距此只有8km的马坊却没有喷水冒砂;天津市的震害较明显地分为两个区,即A区(以和平区为主)的房屋倒塌率为12%,B区(以南开区为主)为6.4%,而且在以往的历次地震中都有A区震害重于B区的震害现象,但这两个地区场地土类均不存在足以引起震害异常的重大差别。1970年3月土耳其Gediz地震时,在震中85km范围内人员和建筑物损失惨重,超出这个范围一般震害很轻,但远离震中135km的Tofas汽车制造厂的单层汽车库和喷漆车间却发生了部分倒塌。1985年9月墨西哥8.1级地震,使位于200m厚软黏土覆盖层上的墨西哥市(震源距370km)遭受严重损害,10~15层的建筑物受害尤其严重,5层以下建筑物受害数远比6层以上的少,而距这些受害建筑物不远的的一个43层超高层建筑物却安然无恙。对于土层地震反应,很多学者在此领域进行了专门研究。Idriss和Seed^[19]、Schnabel^[20]、Martin和Seed^[21]、廖振鹏等^[22]采用等效线性化方法求解地基地震反应;Richart^[23]将特征线法应用于地基地震反应;王志良等^[24]在吸收Seed、Streeter等工作成果的基础上,利用特征线-差分混合解法,提出了新的差分格式并求解了包含黏性、弹塑性的水平土层在地震剪切波作用下的运动方程。周锡元^[25]提出半无限长剪切梁上剪切型多质点系地震反应的傅里叶变换方法。该法可以用来分析从基岩中垂直向上传播的任意剪切波所引起的土层振动,同时也可用于已知地面运动加速度求解基岩中入射波以及基岩和土层分界面上的振动反应。吴再光等^[26]在总结现有计算土层平稳随机地震反应等价线性化法的基础上,

提出了非线性土层随机地震反应概率平均等价线性化方法,并在线性结构非平稳反应离散时域分析的每一离散时段中引入概率平均等价线性化法,在每一时段内对土层动力非线性等价线性循环迭代,计算各时段等价线性系统的反应统计量,最后将各时段反应连接起来,得出土层非平稳反应的近似值。何广讷等^[27]采用能量分析的基本原理和方法,对场地进行动力反应分析,该方法简单实用。廖河山等^[28]应用一维复合应变波理论和特征线差分法,采用多重屈服面运动硬化弹塑性模型,研究土层的非线性地震响应,此外还在土层与基岩半空间的界面上,引进了弹性边界条件,能模拟波在半空间介质中的传播过程,从而使数值分析结果更加接近实际。采用此方法为南浦大桥提供了 16 组沿深度分布的地震加速度时程,已经用于南浦大桥的抗震设计中。李天等^[29]根据工程场地实际存在的种种不确定因素,提出了用 Monte Carlo 机仿真技术进行具有随机参数的场地进行地震反应计算。李小军等^[30]以中心差分法为基础,结合 Newmark 常平均加速度法的基本假定,推导了一种求解有限自由度有阻尼体系动力方程的自起步显示差分格式,此格式的稳态条件与一般中心差分格式的相当,其计算精度不低于二阶精度。陈国兴等^[31]将整个地震持时分成若干时段,对每个时段用等效线性迭代进行多次线性分析,等效剪应变幅值取该时段剪应变均方根的 $\sqrt{2}$ 倍,此法不仅考虑了动模量与动剪应变之间的非线性关系,而且还考虑了振动孔隙水压力的增长对土的模量和强度的衰退作用。周克森^[32]引入“二维”时间坐标,并通过因子 $\delta-\theta$ 推广的动力显示差分方程,使得在任何情况下非线性土层地震反应均可获得稳定、收敛的计算结果。栾茂田等^[33,34]基于改进的一维剪切梁模型,对于成层非匀质场地推导了确定自振频率、振型函数、参与系数及稳态动力响应的封闭解析表达式,进而提出了场地地震反应简化的分析方法。Towhata^[35]也得到了非匀质场地弹性地震反应解析解。楼梦麟^[36]应用模态摄动原理和一维剪切波动方程,建立了变参数土层自振特性的简捷计算方法,从而为计算变参数土层地震反应提供了一个有效的计算手段,这一方法不仅适用于分层均匀土层,也适用于土介质物理特性沿深度不均匀变化的土层,这种变化规律即可用解析函数表示,也可采用列表函数表示,因而具有普遍适用性,数值分析结果也表明这一方法具有良好的计算精度。Batta 等^[37]、Abouseeda 等^[38]应用边界元、有限元-边界元混合计算进行了地震反应分析。

一些专家、学者对土体地震反应的模型、某一性质的土体动力特性进行了专门研究。Dafalias^[39,40]、Victor^[41]提出了弹塑性界面模型;栾茂田^[34]提出了土动力非线性分析中的变参数 Ramberg-Osgood 本构模型。曾国熙等^[42]在自振柱仪上研究了国内三个电厂的粉煤灰动剪切模量特性。研究发现,粉煤灰动剪切模量随周围有效应力的增加而增加,随孔隙比的增加而减少,颗粒的尺寸、级配和表面形状也将影响动剪切模量值,饱和度的变化将导致动剪切模量的改变;通过比较还发现,在相同密度的条件下,粉煤灰的动剪切模量约为砂土的动剪切模量的 30%~

60%。丰万玲^[43]对三种煤灰土的模量、阻尼和液化特性进行了试验研究。结果表明,煤灰土在纵向和扭转振动时的动应力-应变关系很好地满足了双曲线关系;就动剪切模量而言,煤灰土的动力特性介于砂土和黏土之间,似乎更接近于砂性土,影响煤灰土阻尼特性的最明显因素是剪应变幅值,其次是周围压力,而密度对细煤灰土阻尼的影响并不大,对粗煤灰土有一定影响,含水量几乎不影响煤灰土的阻尼值,细煤灰土在低密度时的抗液化强度很低,而且固结比的影响也不显著。吴世明^[44]研究了非饱和无黏性土的动剪切模量,认为影响无黏性土的动剪切模量的因素很多,对于细粒无黏性土,饱和度是主要因素之一,非饱和无黏性土颗粒之间的毛细压力使土颗粒间的有效应力增加,从而使动剪切模量增加,对于小应变幅 G_0 值,存在一最佳饱和度,这时 G_0 值的增大达到最大值。最佳饱和度与对应的 G_0 值的增大与土的有效粒径有关,即当应变幅增大时,比值 G/G_0 随应变幅的增大而减小,即这种使 G 值增大的非饱和效应会随应变幅的增大而减弱。俞培基等^[45]研究了石灰岩人工砂的动剪模量和阻尼比,认为石灰岩人工砂在动力变形特性方面的特点是:固结时间和先期压密对 G_{\max} 的影响显著,固结主应力由 1.0 增加到 2.0,使颗粒结构趋于稳定,表现为先期压密对 G_{\max} 的影响减少,动剪切模量衰减曲线和阻尼比曲线都向右移。固结应力对动剪切模量衰减曲线和阻尼比曲线都有影响,引进参考剪应变 γ_r 不仅能使前者归一化,同时也能使后者归一化,由共振柱试验实测的动剪切模量和阻尼比与由动三轴试验结果换算值之间,可望取得令人满意的衔接。在剪应变幅自 $1 \times 10^{-6} \sim 1 \times 10^{-2}$ 范围内,土的动应力-应变关系并不符合简单双曲线关系。廖济川等^[46]结合地震小区划对皖西硬黏土的动力特性进行了一些研究,通过电镜扫描分析了微观结构对硬黏土力学性质的影响,从现场单孔检层法测定的剪切波速及室内动三轴试验结果,得出硬黏土的应力-应变关系符合双曲线模式,其形态与土样裂隙分布状态有关,并利用 Iwan 模型计算场地土层的动力反应,分析了地面反应谱与场地土层条件的关系。阮永芬等^[47]研究了饱和粉土的若干动力特性,认为黏粒含量的多少对粉土动力特性起着举足轻重的影响,Hardin 公式仍适用于粉土,但 G_{\max} 随黏粒含量增加而线性下降,随黏粒含量增加,动强度降低,抗液化强度提高,当 $P_c = 15\%$ 时,土也不会液化;粉质含量及土样成型时间对其动力特性影响也是不可忽视的,而 OCR 及密度等对粉土的影响规律与砂土相似。陈国兴等^[48]对现有的土的动应力-应变关系试验结果进行了分析和总结,推荐了用不同物性指标估算 G_{\max} 的经验公式,用塑性指数 I_p 描述 $G/G_{\max} - \gamma$ 和 $\lambda - \gamma$ 关系的经验曲线,并提出了用 I_p 为参数的 G_{\max} 、 $G/G_{\max} - \gamma$ 和 $\lambda - \gamma$ 曲线的经验公式。何昌荣^[49]通过动模量和阻尼的动三轴试验认为:随应变增减,动模量增减几倍到几十倍,固结压力、密实程度、土类不同也会明显影响动模量、阻尼特性,如有初始剪应力时,用平均应力 σ_m 不能完全反映其变化,最大动模量随 σ_m 增减, n 的一般范围为 0.35~0.7,频率变化对砂性土影响不大,在频率 $f = 0.1 \sim 5\text{Hz}$ 范围,可使黏

性土动模量明显或几倍增减,黏性土的稠度状态和超固结比也使动模量成倍增减,而对动三轴的机电和量测系统改进后,可较准确地量测到应变 1×10^{-6} 级。酚能惠等^[50]研究了储灰场的动力反应,即燃煤火电厂湿法储灰场的灰渣沉积层往往处于饱和和松软状态,难以在其上建造子坝,且灰渣层在地震作用下极易发生液化,危及灰坝安全,由此结合某些电厂储灰场的子坝加高工程,在室内外试验的基础上,用有效应力动力分析方法,计算地震作用下储灰场的动力反应,从而可以反应贮灰场的施工与运行状况以及地震时动力性状。王建华^[51]基于非等向硬化模量场增量弹塑性模型,建立了平面应变问题的弹塑性动力分析方法,并进行了软土地基弹塑性地震响应分析。陈厚群等^[52]阐述了通过地震自由场地表运动的反演分析、正演计算确定坝址河谷自由场地震运动的途径和拱坝自由场地震输入多点激振的抗震分析方法。周健等^[53]和高玉峰^[54]以 Biot 波动方程为基础,采用非线性模式,提出了考虑两相土共同作用的三维有效应力动力分析法,并用空间等参数有限元法逐步计算动力反应和孔隙水压力的产生、扩散和消散,真正地把三维土坝的动力反应分析与动力渗流、液化的发生、发展及土骨架变形统一起来分析。

参 考 文 献

- 1 胡聿贤. 在抗震规范中不用地震烈度的一个建议. 建筑结构学报, 1983, (1): 32~39
- 2 胡聿贤. 有关设计地震动的几个问题. 土木工程学报, 1993, 26(2): 1~7
- 3 胡聿贤. 地震工程学. 北京: 地震出版社, 1988
- 4 Cornell C A. Engineering seismic risk analysis. BSSA, 1968, 58(5): 1583~1606
- 5 Kiureghian A der, Ang A H-S. A fault rupture model for seismic risk analysis. BSSA, 1977, 67(4): 1173~1195
- 6 Savy J B. Nonstation risk model with geophysical input. J. ST. ASCE, 1980, 106(1): 145~163
- 7 Patwardhan A S. A semi-Markov model for characterizing recurrence of great earthquakes. BSSA, 1980, 70(2): 323~347
- 8 王卓. 地震发生的更新过程模型及其在地震危险性分析中的应用. 地震工程与工程振动, 1986, 6(2): 17~26
- 9 沈建文, 华宜平, 邱瑛等. 关于地震危险性分析的经验点椭圆模型. 地震学报, 1989, 11(3): 259~267
- 10 章在埔, 陈达生. 二滩水电站坝区场地地震危险性分析. 地震工程与工程振动, 1982, 2(3): 1~15
- 11 张裕明, 周本刚. 潜在震源区范围的确定. 中国地震区划文集. 北京: 地震出版社, 1993, 34~41
- 12 胡银磊, 张裕明, 董瑞树等. 中国大陆地震($M_s \geq 6.0$)震中与其发震断层距离的统计分析及其在确定潜在震源区边界中的应用. 中国地震, 1996, 12(2): 224~228
- 13 Housner G W. Characteristics of strong motion earthquakes. BSSA, 1947, 37(1): 19~31
- 14 胡聿贤, 何训. 考虑相位谱的人造地震动反应谱拟合. 地震小区划理论与实践(廖振鹏主编). 北京: 地震出版社, 1989
- 15 朱昱, 冯启民. 相位差谱的分布特征和人造地震波. 地震工程与工程振动, 1992, 12(1): 37~44
- 16 刘鹏程, 林皋, 金春山. 考虑地震环境的人造地震动合成方法. 地震工程与工程振动, 1992, 12(4): 9~15
- 17 金星, 廖振鹏. 地震动强度包络函数的理论研究. 地震学报, 1994, 16(4): 519~525

- 18 谢礼立,周雍年. 一个新的地震动持续时间定义. 地震工程与工程振动,1984,4(2):27~35
- 19 Idriss I M, Seed H B. Seismic response of horizontal soil layers, J. SM. ASCE,1968,94(4):1003~1031
- 20 Schnabel P. Modification of seismograph records for effects of local soil conditions. BSSA,1972,62(6):1649~1664
- 21 Martin P P, Seed H B. One dimensional dynamic ground response analysis. J. Geotech. Engrg. ASCE,1982,108(7):935~952
- 22 廖振鹏,李小军. 地表土层地震反应的等效线性化解法. 地震小区划理论与实践. 北京:地震出版社,1989
- 23 Richart Jr E E. Some effects of dynamic soil properties on soil-structure interaction. J. Geotech. Engrg. ASCE,1975,101(12):1197~1240
- 24 王志良,韩清宇. 黏弹塑性土层地震反应的波动分析法. 地震工程与工程振动,1981,1(1):117~137
- 25 周锡元. 离散化层状土地震反应分析的傅里叶变换方法. 地震工程与工程振动,1981,1(2):25~35
- 26 吴再光,林皋,韩国城. 水平成层地基非平稳随机地震反应分析,土木工程学报,1992,25(3):60~67
- 27 何广讷,曹亚林. 饱和无黏性土动力反应的能量分析原理与方法. 土木工程学报,1990,23(3):2~10
- 28 廖河山,徐植信. 场地土的一维非线性地震反应分析方法. 地震工程与工程振动,1992,12(4):30~39
- 29 李天,李杰. 具有随机参数的场地地震反应分析. 岩土工程学报,1994,16(5):79~83
- 30 李小军,廖振鹏,杜修力. 有阻尼体系动力问题的一种显式差分解法. 地震工程与工程振动,1992,12(4):74~80
- 31 陈国兴,谢君斐,韩炜等. 土体地震反应分析的简化等效应力法. 地震工程与工程振动,1995,15(2):52~61
- 32 周克森. 一维土层非线性地震反应分析的 $s-\theta$ 法. 地震工程与工程振动,1996,16(4):1~14
- 33 栾茂田,金崇馨,林皋. 非均质地基振动特性及地震反应分析. 大连理工大学学报,1992,32(1):81~87
- 34 栾茂田. 土动力非线性分析中的变参数 Ramberg-Osgood 本构模型. 地震工程与工程振动,1992,12(2):69~77
- 35 Towhata I. Seismic wave propagation in elastic soil with continuous variation of shear modulus in the vertical direction. Japanese Soil and Foundation,1996,36(1):61~72
- 36 楼梦麟. 变参数土层的动力特性和地震反应分析. 同济大学学报,1997,25(2):155~160
- 37 Batta V, Pekau O A. Application of boundary element analysis for multiple seismic cracking in concrete gravity dams. EESD,1996,25(1):15~30
- 38 Abouseeda H, Dakoulas P. Response of earth dams to P and SV waves using coupled FE-BE formulation. EESD,1996,25(11):1177~1194
- 39 Dafalias Y F. Bounding surface plasticity. I: mathematical foundation and hypoplasticity. J. Engrg. Mech. ASCE,1986,112(9):966~987
- 40 Dafalias Y F, Herrniann L R. Bounding surface plasticity. II: application to isotropic cohesive soils. J. Engrg. Mech. ASCE,1986,112(12):1263~1291
- 41 Victor N. Theoretical aspects of the elastoplastic bounding surface model for cohesive soils. Japanese Soil and Foundations,1990,30(3):11~24
- 42 曾国熙,顾尧章,吴建平. 粉煤灰的动剪切模量. 岩土工程学报,1985,7(5):1~9
- 43 丰万玲. 煤灰土的动力特性. 岩土工程学报,1986,8(2):24~34
- 44 吴世明. 非饱和和无黏性土的动剪切模量. 岩土工程学报,1985,7(6):34~42

- 45 俞培基,梁用霞,秦蔚琴. 石灰岩人工砂的动剪模量和阻尼比. 岩土工程学报,1988,10(4):57~63
- 46 廖济川,何光. 硬黏土的动力特性及地震反应. 岩土工程学报,1993,15(4):15~25
- 47 阮永芬,巫志辉. 饱和粉土的若干动力特性研究. 岩土工程学报,1995,17(4):100~106
- 48 陈国兴,谢君斐,张克绪. 土的动模量和阻尼比的经验估计. 地震工程与工程振动,1995,15(1):73~84
- 49 何昌荣. 动模量和阻尼的动三轴试验研究. 岩土工程学报,1997,19(2):39~48
- 50 郦能惠,沈珠江,朱家谟. 贮灰场的地震反应分析及抗震加固. 岩土工程学报,1991,13(3):13~25
- 51 王建华. 软土地基弹塑性地震响应分析. 振动工程学报,1995,8(4):317~323
- 52 陈厚群,侯顺载,王均. 拱坝自由场地地震输入和反应. 地震工程与工程振动,1990,10(2):52~61
- 53 周健,吴世明,曾国熙. 土石坝三维二相动力分析. 岩土工程学报,1991,13(5):64~69
- 54 高玉峰. 工程抗震设计中地基动力参数研究. 学位论文. 浙江大学,1999

第二章 地震危险性概率分析

2.1 地震危险性概率分析中不确定性因素及其影响

地震危险性概率分析方法首先由美国学者 Cornell 于 1968 年提出^[1], 之后得到广泛应用。其结果可作为某项工程用于抗震设计的地震动工程参数, 其可靠程度不仅取决于该方法本身, 而且有赖于地震地质学、地震学、地震工程学等学科的相互渗透、发展, 并且自该方法问世以来, 不确定性问题就突出地存在。下面将从地震危险性概率分析涉及的几个方面入手, 通过具体计算, 研究不确定性因素及其影响^[2~4]。

2.1.1 地震危险性概率分析方法简述

设对工程场地产生有效影响的潜在震源区有 N 个, 其地震的发生符合均匀泊松过程, 且 V_i 为第 i 个潜在震源区震级为 $M \geq M_0$ 的地震年平均发生率。由此可得场地一年中地震动 Y 超过某确定 y 的概率为

$$P(Y \geq y)_{1\text{年}} = 1 - \exp\left[-\sum_{i=1}^N P(Y \geq y|E_i)V_i\right] \quad (2.1.1)$$

式中, $P(Y \geq y)_{1\text{年}}$ 为一年中地震动 Y 超过 y 的概率; $P(Y \geq y|E_i)$ 为某潜在震源区 E_i 地震动 Y 超过 y 的概率。

对于椭圆模型有

$$P(Y \geq y|E_i) = \int_{M_0}^{M_u} P(Y \geq y|E_i, m)f(m)dm \quad (2.1.2)$$

式中, $P(Y \geq y|E_i, m)$ 为某潜在震源区 E_i 发生地震 m 时, 地震动 Y 超过 y 的概率; $f(m)$ 为震级概率分布的概率密度函数。

$$f(m) = \frac{\beta e^{-(m-M_0)}}{1 - e^{-\beta(M_u-M_0)}}, \quad \beta = b \ln 10 \quad (2.1.3)$$

式中, M_0 为起算震级; M_u 为震级上限; b 为古登堡-里克特公式常数。

由上面简述可以看出, 地震危险性概率分析涉及潜在震源区、地震动衰减关系、震级上限、年发生率、 b 值、起算震级等方面内容, 它们也是地震危险性概率分析中的不确定性因素。

2.1.2 不确定性因素对地震危险性分析计算结果的影响

为了讨论各不确定性因素对地震危险性概率分析结果的影响, 假设一个四边

形潜在震源区,其地理坐标为(118.25°E,32.5°N)、(117.75°E,32.5°N)、(117.75°E,31.5°N)和(118.25°E,31.5°N)。考虑不确定性的最大影响,计算点取为潜在震源区的中心,即(118°E,32°N)。潜在震源区地震活动性参数初始取为

$$M_u = 6.5, \quad b = 0.7,$$

$$V = 0.002, \quad M_0 = 4 \frac{3}{4}$$

采用 3 组衰减关系:

衰减关系 1(沈建文等^[5])

$$I = 0.0782 + 1.5M - 0.8725 \ln R - 0.0025R, \quad \sigma = 0.58 \quad (2.1.4)$$

$$\ln Y = -2.651 + 0.5958M - 1.0175 \ln R - 0.0005R, \quad \sigma = 0.89 \quad (2.1.5)$$

衰减关系 2(国家地震局^[6])

$$I_a = 6.046 + 1.48M - 2.081 \ln(R + 25), \quad \sigma = 0.49 \quad (2.1.6)$$

$$I_b = 2.617 + 1.435M - 1.441 \ln(R + 7), \quad \sigma = 0.56 \quad (2.1.7)$$

衰减关系 3(霍俊荣^[7])

$$I_a = 4.152 + 1.419M - 3.642 \lg(R + 15), \quad \sigma = 0.58 \quad (2.1.8)$$

$$I_b = 2.404 + 1.419M - 3 \lg(R + 7), \quad \sigma = 0.58 \quad (2.1.9)$$

$$\lg Y_a = 1.164 + 0.846M - 2.446 \lg(R + 0.627e^{0.612M}), \quad \sigma = 0.26 \quad (2.1.10)$$

$$\lg Y_b = 0.207 + 0.808M - 2.026 \lg(R + 0.183e^{0.703M}), \quad \sigma = 0.26 \quad (2.1.11)$$

式中, I 为地震烈度; Y 为峰值加速度; M 为地震震级; R 为衰减半径; a 为椭圆长轴; b 为椭圆短轴; σ 为方差。50 年超越概率取 3%。

采用单因素法进行不确定性分析,即其他参数取值不变,只改变所分析的那个参数取值。

1. 衰减关系的不确定性

一般来说,地震的破坏作用在震中区最大,远离震中区则逐渐减弱。对于地震烈度,历史地震等震线近似椭圆,可以采用椭圆衰减模型,选取历史地震烈度资料,统计回归得出地震烈度的衰减关系。由于历史地震记录不完整,地震烈度调查不精确,地震烈度的衰减关系也不唯一。对于地震峰值加速度,由于我国缺乏强震记录,尚需借用其他可类比国家的地震烈度、地震加速度资料才能建立衰减关系,因而地震加速度的衰减关系存在更大的不确定性。计算结果表明:地震动衰减关系的不确定性对计算结果的影响如下(表 2.1.1):

(1) 地震动衰减关系的不确定性对地震烈度的影响较小。