

地震 小区划

理论与实践

廖振鹏 主编

DI ZHEN
XIAO
QU HUA

地震出版社



地震小区划

——理论与实践

廖振鹏 主编

地震出版社

1989

内 容 提 要

本书是我国地震小区划实践经验和有关科研成果的总结。它全面而系统地介绍了当前地震小区划工作的基本技术路线和各个主要工作环节。全书包括地震小区划概论、地震危险性分析和设防基岩地震动、场地力学模型及场地地震反应的计算方法、设计地震动小区划图的编制以及地面破坏小区划的若干问题等五部分,共20篇文章。它可供从事城市地震小区划或为重大工程场地综合评定设计地震动参数的工程和地震工作者参考,也有助于了解工程地震科学的现状和存在的问题,以推动这一领域的基础研究。

地 震 小 区 划

——理论与实践

廖振鹏 主编

责任编辑:蒋乃芳

责任校对:李和文

地 震 出 版 社 出 版

北京复兴路63号

北京朝阳区小红门印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行

全国各地新华书店经售

787×1092 1/16 18印张 460千字

1989年12月第一版 1989年12月第一次印刷

印数 0001—2300

ISBN 7-5028-0135-9/P·92

(534) 定价:10.00元

序

随着我国国民经济建设的迅速发展,近几年地震区许多大城市和大型工矿企业均进行了地震小区划,以保障安全。对于一般中小城市或单项工程,可以按照全国地震区划图及抗震规范进行选址与设计。但大城市与大型工矿企业有其整体的重要性,一旦遭受强震袭击,后果是巨大的灾难,唐山的惨痛教训不可或忘。因此,对于大城市与大型工矿企业,除按抗震规范要求进行一般考考外,还要求在下述两方面进行更全面的具体的补充。第一,要求比针对全国地震区划图更详细而具体的地震危险性分析,审查并补充全国区划时未详细考虑的地震与地质情况,结合本城市或本工矿的特点,提出地震危险性估计。第二,结合区内的具体工程地质条件及地震环境,指明区内各地点可能产生的地基破坏和可能遭受的地震动的设计参数。这是当前国内外通用的原则。

我国的地震小区划工作开始于50年代,当时地球物理所对北京进行过烈度调整的小区划;60年代,工程力学研究所提出了我国自己的调整设计反应谱的方法,并按此进行过北京与天津的小区划;70年代,国家地震局、建委与北京市等有关单位合作,按前述两方面具体考虑的原则,再次对北京市进行了小区划;80年代,国家地震局下属各单位对许多重大工程场地进行了地震危险性估计,城乡建设与环境保护部以及国家地震局下属有关单位分别对许多大中城市进行了地震小区划,一般都是按上述原则进行的。在地震、地质与工程建设三方的结合下,我国地震小区划工作成绩显著,具有国际先进水平。

廖振鹏同志长期从事近场强地震学研究,在地震波动及地震动估计方面卓有成绩。近几年又结合我国工程建设,致力于地震小区划工作,为国家地震局草拟了地震小区划工作大纲,负责进行了大连市小区划,并协助有关省地震局进行过几个城市的地震小区划,对国内外地震小区划工作进行过系统的总结分析,提出了许多有益的建议。由他综合汇编的本书,全面而系统地介绍了地震小区划的原则和方法,既有理论根据和主要方法步骤,又有具体实例。从而本书既是全面的现有水平的总结,又是进行实际工作的重要参考,必将对我国地震小区划与国民经济建设起良好推动作用。

胡聿贤

1987年9月20日

引 言

地震小区划的目的是估计城市或厂矿范围内可能遭遇的地震破坏作用的分布,为工程结构抗震设计提供依据,并为城市和厂矿制定土地利用规划、进行震害预测和制定减轻地震灾害计划提供基础资料。它是减轻地震灾害工作的一个重要环节,是在我国广大地震区内进行城市规划和工程建设必须完成的一项任务。随着我国四化建设的发展,地震小区划工作受到了政府的重视和社会的广泛关注。为了结合我国实际情况并利用当前工程地震学的研究成果更好地进行这一工作,本书试图系统地从工程角度介绍地震小区划的基本知识,供关心减轻地震灾害问题和从事地震小区划的工程和地震工作者以及大学有关工程专业的师生参考。

根据我国地震小区划实践经验和国内、外工程地震学的研究成果我们认为:第一,以减轻地震灾害为目标的地震小区划应区分为设计地震动小区划和地面破坏小区划两种类型。第二,设计地震动小区划应采用相互配合的两种方法:(1)适用于大量中、小城市和厂矿的场地分类法,即在地震区划的基础上按抗震规范进行场地分类并确定相应的设计地震动参数;(2)适用于大城市和重要厂矿的专门地震小区划,即在专门研究地震环境和详细勘测场地条件的基础上将两者结合起来直接进行设计地震动小区划。第三,地震小区划是一项综合性的工程地震工作,它涉及到工程地震学的几乎所有研究领域。为了逐步完善地震小区划方法应当全面加强工程地震学的基础研究。这些认识是编辑本书的基本指导思想。

第一部分概论介绍地震小区划的一般知识以及工程地震研究和抗震规范研究的有关背景知识。通过阅读本部分各文章将有助于读者对地震小区划问题获得较为全面并有一定深度的了解。其中“关于地震小区划的若干观点和建议”讨论了地震小区划的若干基本问题,包括地震小区划的产生及其特点、地震的破坏作用和地震小区划的类型、地震小区划在我国的演进、新的设计地震动小区划方法。同时还对地震小区划的基础研究和如何进行当前的地震小区划工作提出了建议。“场地条件对震害和地震动的影响”一文总结了近年来我国在地基土层、断层、局部地形等场地条件对震害和地震动的影响方面若干主要研究成果,说明了地震小区划的必要性。同时,讨论了这些研究成果在我国抗震规范中有关场地选择和选用设计地震动参数方面的某些应用。由于一般建筑结构的抗震设计采用地震反应谱作为设计地震动参数,“规范用抗震设计反应谱的修订趋向”一文从分析场地分类的原则着手对抗震规范中关于设计反应谱的选用做了简要回顾,着重论述了我国新修订规范拟选用的地震环境——场地相关的设计反应谱分类方法。本章内容对于改进场地分类地震小区划方法有参考价值。

第二到第四部分共12篇文章,讨论设计地震动小区划,这是本书的重点。如上所述,设计地震动小区划可以采用两种方法:场地分类法和专门进行的设计地震动小区划。场地分类法的主要工作环节如图1所示。由于这一方法较为简便并已成为我国工程界所熟悉,同时,有抗震规范和地震区划图为依据,它不是讨论的重点。本书在这一部分主要讨论专门进行的设计地震动小区划。它所包含的基本工作环节如图2所示。根据图2,设计地震动小区划包括三个基本环节:地震危险性分析和设防基岩地震动的确定;局部场地力学模型的建立和设计地震地面运动的计算;设计地震动小区划图的编制。这三个基本环节分别是第二部分、第三

部分和第四部分的论题。第二部分“地震危险性分析和设防基岩地震动”主要介绍估计地震小区划地震输入的方法,包括根据地震危险性分析确定设防基岩地震动参数和合成基岩地震动加速度时程的方法。将地震危险性分析用于确定设防基岩地震动参数包括两项基本工作:①建立地震发生的概率模型,②建立地震动衰减规律。在这两项工作的基础上可以确定地震危险性曲线,进而按照一定设防概率水平确定设防基岩地震动参数。其中“地震小区划的基岩地震动输入”一文以确定合肥市地震小区划基岩地震动输入为例,系统地介绍了目前工程上常用的地震危险性分析方法。“缺乏强震观测资料地区地震动参数的估算”和“地震烈度衰减的概率模型”旨在改进上述地震危险性分析的第二项基本工作,即如何合理地利用地震烈度资料建立地震动参数的衰减公式。前者介绍了在震级或震中距相同的条件下利用地震烈度与地震动参数的转换关系求得地震动参数衰减规律的方法,并用几个地区已知的地震动和烈度资料对建议的方法作了比较验证。后者在考虑地震烈度评定和预测的不确定性的基础上提出了建

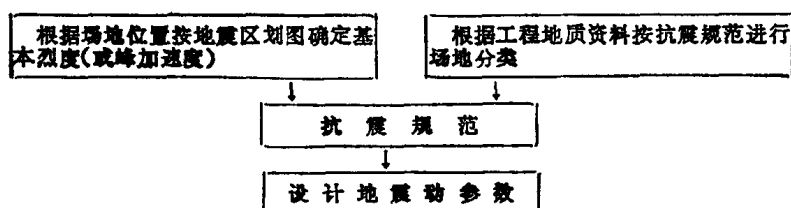


图1 场地分类地震小区划

立地震烈度衰减概率模型的方法。从一个新的角度探讨了在地震危险性分析中应用烈度资料估算地震动参数的方法。“地震发生的概率模型”简要地介绍了当前考虑地震时间序列的非平稳和空间分布非均匀性的各种概率模型,比较了它们的优缺点并讨论了它们在地震危险性分析中应用的可能性。这对于合理地利用地震地质和地震活动性的信息,改进当前地震危险性分析中采用的平稳和均匀的地震发生模型有参考意义。地震地质和地震活动性研究是建立地震发生模型的基础性工作,由于本书着重从工程角度介绍地震小区划的方法,这些重要的地震学研究课题宜另由专著介绍。利用上述地震危险性分析方法可以确定设防基岩地震动

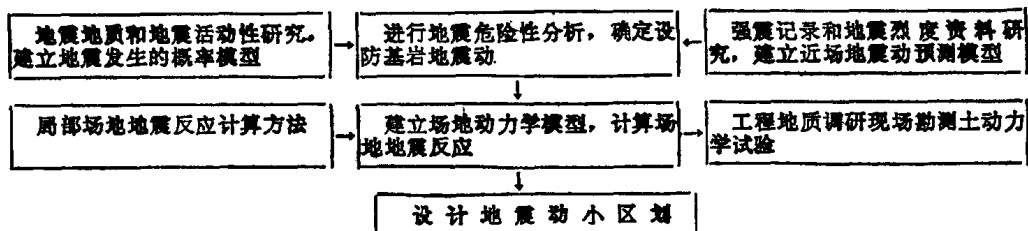


图2 设计地震动小区划

参数,包括地震反应谱和强烈地震动的持续时间等。设防基岩地震动加速度时间过程在工程上通常采用随机振动理论通过拟合设防基岩地震动参数的方法获得。“考虑相位谱的人造地震动反应谱拟合”对上述工程拟合技术做了改进,提出了一种新的谱拟合技术,改进了拟合的精度和迭代收敛的速度。“设计地震加速度图的合成”分析了上述工程合成方法的缺点,并将地震学有关研究成果和上述工程方法结合起来提出了合成基岩地震动加速度图的一个半经验物理模型。按照这一模型合成的加速度图不仅在统计意义上符合已有强震记录包含的振幅谱信息,而且符合相位谱信息。更重要的是利用这一模型可以考虑场地相对于发震断层的方

位的不确定性以及震源破裂方式的不确定,以便提供一组反应这些不确定性的设计地震加速度时程。第三部分为场地力学模型及场地地震反应的计算方法,其中“弹性波速度的测试方法和技术”和“土壤的动剪切模量和滞回阻尼比”分别介绍土动力学参数的现场和室内测定、测试数据的分析整理以及典型测定结果,其目的在于为建立场地力学模型提供基本数据。前者的内容包括原位波速测定的原理,人工震源,波相识别等。此外,作者还介绍了他所收集和整理得到的剪切波速和土类和土层深度之间的统计经验公式,供读者参考使用。后者介绍基本土动力学参数的定义及其随应变而变的经验函数形式,以及测定这些参数的实验室方法,包括三轴试验和共振柱试验。最后,作者还提供了各种土壤的典型动剪切模量和滞回阻尼比的数值表、供无试验资料时参考选用。本部分的另三篇文章介绍局部场地地震反应的计算方法,其中“地表土层地震反应等效线性化解法”介绍了工程上常用的非线性土层地震反应的等效线性化解法,系统地 and 详细地讨论了一维问题的解法,包括用简明的矩阵形式导出基本计算公式,给出计算方框图和相应的计算程序以及对重要计算细节的说明。“无限弹性介质中暂态标量波问题的有限模型”就简单的标量波情形详细讨论了人工边界的处理方法,论证了这一方法的精度和有效性,并讨论了将此法推广到矢量波情形的途径。“近场波动问题的有限元解法”根据有限差分方法导出了一种物理概念清楚、使用方便的集中质量有限元模型,将它和人工边界处理方法相结合可用于计算复杂局部场地在地震波作用下的反应。这一解法具有有限元法的模拟复杂介质的灵活性和有限差分计算的简便性,并可大大降低对计算机容量的要求。“地震波散射问题的数值解”以二维问题为实例讨论如何利用近场波动问题的有限元法计算复杂局部场地条件对地震动的影响,着重阐明了计算中的各个主要的技术问题。第四部分设计地震动小区划图的编制主要介绍地震小区划指标的选取以及设计地震动小区划图的编制方法。其中“设计地震反应谱的双参数标定模型”回顾了设计地震反应谱工程标定方法的演进,着重介绍了Newmark-Hall提出的用峰加速度和峰速度两个参数标定设计反应谱的方法以及作者对这一方法的改进。作者通过大量强震记录的统计分析检验了这一改进的方法。在此基础上作者对设计地震动小区划的指标提出了具体建议。“设计地震动小区划的实现”通过合肥市设计地震动小区划工作系统地介绍了设计地震动小区划图的编制方法。

第五部分“地面破坏小区划的若干问题”中的“新抗震规范中有关地基震害预测与设防的规定”从工程观点简明扼要地介绍了对地面破坏地震小区划若干主要问题的现有认识水平,这一介绍是结合新修订抗震规范进行的,内容包括地基的震害及其启示,几种不利的地基类型及其设防措施,以及液化地基的预测与设防。根据地基震害调查的结果,在平原区砂土液化是地基震害的一种重要形式。“砂土液化判别方法”对这一重要问题又做了进一步系统的介绍,内容包括砂土液化的原理、砂土液化引起地面破坏的形式、液化可能性的各种判别方法。此外,作者还就液化后果严重程度的分等、地基和基础应采取的预防措施提出了讨论和建议。断层地震效应的评价是地面破坏小区划和工程建设中经常遇到的困难问题。“断层的地震效应与震害影响”汇总了作者接触到的与断层有关的宏观震害资料。通过对这些资料的对比和分析,提出了对不同性质断层的处理意见,可供城市地震小区划和制定城市抗震防灾规划时参考。

本书主要反映我国地震工程和工程地震研究人员近年完成的若干主要研究工作。部分篇章的内容曾分散发表于不同期刊,在将这些文章收入本书时,根据本书的目的编者请作者对

原文做了补充和修改。其他文章是编者按照本书内容的需要约请有关同志专门撰写的。在最后汇总成书时编者又对若干内容做了适当修改。由於本书各文分别由不同作者以论文形式撰写而成，文字表述和所用记号均自成体系，读者可以根据需要选读。将全书按部分编排的目的仅在于为读者提供各部分内容在地震小区划工作中的地位及其相互关系。地震小区划涉及的问题较广，限于编者水平，误谬之处在所难免，希望读者给予帮助和指导。

本书是在国家地震局科技监测司、国家地震局工程力学研究所和国内有关单位许多同志的鼓励、督促和支持下完成的。特别是在编写过程中得到胡聿贤同志、谢君斐同志和卢寿德同志的大力支持和协助，安德荣同志参加了交付地震出版社前本书图表和原稿的大量准备工作，李小军、刘晶波、孙平善、田启文、张敏政和石兆吉等同志协助编者校对了各文原稿。他们的支持和辛勤劳动促成了本书的完成。编者谨向他们表示诚挚的感谢。

廖振鹏

1987年10月30日

目 录

引 言	V
-----	---

第一部分 地震小区划概论

关于地震小区划的若干观点和建议	廖振鹏	1
场地条件对震害和地震动的影响	胡聿贤 孙平善 章在墉 田启文	12
规范用抗震设计反应谱的修订趋向	周锡元 王广军 苏经宇	19

第二部分 地震危险性分析和设防基岩地震动

地震小区划的基岩地震输入	沈建文 廖振鹏	31
缺乏强震观测资料地区地震动参数的估算方法	胡聿贤 张敏政	44
地震烈度衰减的概率模型	廖振鹏 李大华 孙平善	54
地震发生的概率模型	王阜	75
考虑相位谱的人造地震动反应谱拟合	胡聿贤 何 训	93
设计地震加速度图的合成	廖振鹏 魏 颖	106

第三部分 场地力学模型及场地地震反应的计算方法

弹性波速度的现场测试的方法和技术	刘曾武	122
土壤的动剪切模量和阻尼比	石兆吉	134
地表土层地震反应的等效线性化解法	廖振鹏 李小明	141
无限弹性介质中暂态标量波问题的有限模型	廖振鹏	154
近场波动问题的有限元解法	廖振鹏	166
地震波散射问题的数值解	刘晶波 廖振鹏	179

第四部分 设计地震动小区划图的编制

设计地震反应谱的双参数标定模型	廖振鹏 李大华	196
设计地震动小区划的实现	庄昆元 汪永平	207

第五部分 地面破坏地震小区划的若干问题

新抗震规范中有关地基震害预测与设防的规定	黄存汉	218
砂土液化判别方法	刘 颖	227
断层的地震效应与震害影响	周锡元	238
附录：一维土层地震反应线性化计算程序	李小明	250
英文目录		269
英文引言		271

第一部分 地震小区划概论

关于地震小区划的若干观点和建议

廖振鹏

(国家地震局工程力学研究所)

一、地震小区划的产生及其特点

地震是一种严重的自然灾害。减轻地震灾害的第一步是确定哪些地方有发生破坏性地震的危险和危险的程度如何,以便采取适当的防御措施。为此世界各国通常把国土划分为地震危险程度不同的若干区域,划分的结果用地图形式表示,并在不同区域内制定不同的抗震设防标准,这就是地震区划。例如,我国1977年编制完成的地震区划图就是用基本烈度表示地震的危险程度,把全国划分为基本烈度不同的6类地区。由于地震区划图不宜采用大比例尺,因此,在区划图上只能提供较大地区内地震危险度的平均估计。例如,我国现行地震区划图的比例尺为1:3000000,它只能提供“一定地区(不小于几十平方公里——作者注)在今后一定时期内,在一般场地条件下可能遭遇的最大地震烈度”^[1],即基本烈度(引句中的着重点是作者加的)。因此,地震区划图不可能用于预测地震破坏作用在小范围内的变动。然而人们根据震害经验早就认识到地震破坏作用的大小在几百米以至几十米以内也可能出现显著差异。在特定工程场地进行抗震设计时考虑这种差异无疑具有极大重要性。因此,在地震区划和抗震设计之间存在着一个需要填补的空白,地震小区划就是在这一空白中产生和发展起来的。

随着在世界各国广大地震活动区内大规模工程建设的发展,植根于工程实践需要的地震小区划受到各国地震工程界和地学界的高度重视并获得迅速发展^[2]。本文第三节将对地震小区划在我国的演进作简要的评价。作为这一演进的结果,地震小区划的目的、任务和基本方法已经逐渐明朗化。它的目的可以概括为:预测某一城市或厂矿范围内可能遭遇的地震破坏作用的分布,包括地面破坏的分布和设计地震动参数的分布。地震小区划的结果通常也用地图形式表示,为了显示地震破坏作用在小范围内的变动情况,它的编图比例尺远大于地震区划图采用的比例尺,例如,取用1:10000到1:50000。地震小区划的任务包括:第一,为一般工程和重大工程(例如大型水坝、核电站等)的抗震设计提供设计地震动参数;第二,为城市或厂矿土地利用规划的制定提供基础资料;第三,为震害预测和防灾、救灾措施的制定提供基础资料。为了实现上述目标,当前的地震小区划工作具有如下特点:第一,区分不同的地震破坏作用,编制针对性不同的地震小区划图。这是因为对于不同类型的地震破坏作用需要采用不同的减轻地震灾害的措施(这一特点将在本文第二节中讨论)。第二,重视场地条件对地震破坏作用的影响。除继续重视地表土层的影响外,在当前地震小区划研究中正在全面和逐步深入地分析局部地质构造和地形的影响(这一特点将在本文第三、第四和第五节中

说明)。第三,除对一般中、小城市可以按照全国地震区划图及抗震规范的有关规定进行地震小区划外,对大城市和重要厂矿进行地震小区划时要专门研究地震环境,进行较之全国地震区划图和抗震规范更为具体的危险性评定,建立符合当前地震科学水平的未来破坏性地震的发生模型和近场基岩地震动的预测模型以确定地震输入,并把地震环境和场地条件密切联系起来进行地震小区划(这一特点将在本文第四节中讨论)。

二、地震破坏作用和地震小区划的类型

地震的破坏作用多种多样,极其复杂。但是我们可以根据其性质区分为几种主要类型。就我国地震小区划而言,一般应考虑如下四种地震破坏作用:地面断裂错动;滑坡和崩塌;地基失效和强烈地震动。下面对这四种破坏作用的性质、预防方法和相应的地震小区划问题作简要的讨论。

(一) 地面破裂

绝大部分破坏性地震的原因是沿着地壳内称为断层的某一薄弱面突然发生破裂错动。在许多情况下(但不是在所有情况下)断层错动直通到地球表面。当地面破裂穿过房屋地基、地面构筑物或地下管线时就会直接造成严重破坏。因为这类破坏作用只能威胁恰巧位于地面破裂带上的结构物,解决的办法是在地震小区划图上划分出可能出现的地面破裂带,并避开这一危险带进行建设。根据经验,破裂带的宽度一般不超过0.5km(走滑断层)或1—2km(倾滑断层)。划分地面破裂带遇到的困难是如何确定未来发震断层的位置。这些断层的位置在多数情况下完全不知道,或者只能很不准确地判断。不过,地面破裂虽然能造成严重后果但却是一种极为局部的现象。即使对大地震,遭受这种破坏的区域和强烈地震动造成的广大破坏区相比也是非常小的。其次,地面破裂常出现于较软弱的覆盖土层,地面破裂错动不像基岩那样快和集中,它的准静态性质能通过地基变形和开裂使结构物破坏,但一般不威胁人身安全。因此,在判别地面破裂危险区时应在经济(进一步勘察活断层的费用)和实际效果两个方面的考虑之间取得平衡,根据已掌握的地质构造和活断层资料加以判断,并应考虑判断的不确定性。

(二) 滑坡和崩塌

滑坡有巨大破坏力。不过,滑坡也常为非地震因素(如大雨、人工扰动等)所触发,或由地震与其他因素联合触发。就滑坡的破坏力而言,用加强结构抗御能力或采取措施使大片不稳定的斜坡稳固通常是不实际的。预防的办法仍然是通过地震小区划划分出可能遭到滑坡袭击的区域并使地面建筑避开这一区域。在所有地震破坏作用中,大规模崩塌及其引起的泥石流可能是最不可抗御的。一个典型例子是秘鲁Huascarán山由1970年5月31日地震触发的崩塌,从山上往下流动的土、石和冰雪混合物 $5 \times 10^7 \text{m}^3$,行进速度达55m/s,流动距离约15km,完全覆盖了一个村镇,至少掩埋了18000人。不过,这种灾害仅在极少的地质和地形条件下才会形成。滑坡和崩塌现象常在同一地区由其他非地震原因触发重复发生,我们可以根据过去滑坡和崩塌的经验划分出这类危险区。为此可以把地面地质调查和航空摄影方法结合起来,因为从空中常常可以清楚地看出过去滑坡和崩塌的痕迹。

(三) 地基失效

在地震时地基土的物理性质会发生变化,这可能导致地基失效,即地基土发生残留永久

变形使地面沉降或丧失承载能力。地基失效可能造成建筑物地基破坏或其他问题,如公路、铁路桥梁破坏。它不仅造成经济损失,而且可能严重影响震后救灾。砂土液化是地基失效常见的形式。国内外震害经验告诉我们:砂土液化是造成地震灾害的一个不可忽视的问题。不过,我国震害调查结果也表明,在地震破坏的数以万计的建筑物中,因地基失效而招致上部结构破坏的比例数很小。此外,地基失效主要造成经济损失,一般不造成严重伤亡。例如,1964年日本新潟地震时一栋四层钢筋混凝土公寓房屋因地基失效完全倾倒,但倾倒运动相当慢,屋内居民可以从倾倒房屋外墙走下来而无伤亡。我国地震工程研究人员在震害经验基础上已经拟定了预测砂土液化的简易方法^[3],对地基永久变形也提供了工程判别方法^[4,5]。在地震小区划时可以用这些方法大致划分出可能发生砂土液化的区域并估计地基永久变形。关于地基失效的机理和发生的条件还有许多问题尚未圆满解决,目前正在继续研究^[6,7]。场地选择和地基处理是减轻地基失效震害的有效方法。

(四) 强烈地震动

强烈地震动引起的结构破坏和倒塌是造成大量生命财产损失的最普遍和最主要的原因。根据国内外破坏性地震的调查资料估计,至少95%以上的人员伤亡和建筑物破坏是直接由这一原因造成的。此外,强烈地震动也是其他地震破坏作用如地基失效、滑坡等的外部条件。所以,影响范围广大的强烈地震动是所有地震破坏作用中最重要的。减轻它所产生的地震灾害的主要途径是合理地进行抗震和减震设计,并采取适当的抗震和减震措施。为此需要确定工程场地的设计地震动参数,即进行设计地震动小区划。

综上所述,地震小区划可以分为两类:地面破坏小区划和设计地震动小区划。前者应提供三种小区划图:地面破坏、滑坡和崩塌以及地基失效危险小区划图。这类图件可用于制定城市或厂矿的土地利用规划、工程场地选择或地基土处理方案的制定,以及预测地震时因地面破坏产生的震害。设计地震动小区划图应提供一组设计地震动参数。这类图件可以为抗震和减震设计、抗震加固和预测结构振动破坏提供地震输入。请注意,以上两类小区划都是地震破坏作用的小区划。地震破坏作用和震害后果是两个不同的概念,在工程上将两者加以区分很重要。因为,为地震预防服务的地震小区划无疑应当提供各类地震破坏作用可能的分布范围和大小,而不是它们产生的综合后果或震害。震害预测(也有人称为震害小区划)对于地方政府制定救灾计划是有用的,但不宜用于指导以减轻震害为目标的工程预防。正是因为我们把地震小区划理解为地震破坏作用的小区划,上述小区划的分类才成为可能。如果不分类,用调整地震烈度的方法进行地震小区划,例如,用增大设计地震动的办法来减轻地面破坏引起的地震灾害,显然是极不合理的。为篇幅所限,本文以后部分着重讨论设计地震动小区划。

三、设计地震动小区划在我国的演进

设计地震动小区划方法在我国的演进大致可以分成两个阶段:第一阶段自50年代中期到70年代中期,所用的方法可称为场地分类法,其特点是在地震区划图的基础上按抗震规范进行场地分类以确定设计地震动参数;第二阶段自70年代后期至今,除对一般工程继续使用场地分类法外,还发展了一种新的地震小区划方法。新方法的特点是在统一考虑地震环境和场地条件的基础上确定设计地震动参数。

(一) 第一阶段：场地分类法

早在50年代我国地震工程界就接受了抗震设计的反应谱方法^[9,10]。按照这一方法进行抗震设计需要知道地面绝对加速度反应谱 $SA(T)$ 。它通常表示成

$$SA(T) = a \cdot \beta(T) \quad (1)$$

式中， a 是地面加速度最大值； $\beta(T) = SA(T)/a$ 称为动力系数，是结构周期 T 的函数。设计地震动小区划的目的就是提供工程场地的 a 和 $\beta(T)$ ，或地震影响系数 $\alpha(T) = \beta(T)a/g$ ， g 为重力加速度。提供这些设计地震动参数的发展又以1964年由中国科学院工程力学研究所主编的《地震区建筑设计规范(草案)》为界大致分为两个阶段：

1. 按场地条件调整烈度(50年代初至60年代初)

这是苏联麦德维杰夫首先提出的地震小区划方法^[10]。他认为场地土质条件和地下水位对地震破坏作用的影响可以用调整地震烈度的方法处理。苏联抗震规范^[11]采纳了这一观点。由中国科学院土木建筑研究所于1959年主编的我国第一个抗震规范草案仿效了苏联的做法：设计最大加速度 a 由调整后的地震烈度确定， $\beta(T)$ 则采用单一的标准曲线。

2. 按场地类别调整 $\beta(T)$ (60年代中至70年代中)

从50年代起我国以刘恢先为首的研究人员着手系统地开展地震工程研究。在总结世界各国强震观测和研究、震害经验和抗震规范编制工作的基础上制定了1964年《地震区建筑设计规范(草案)》。在这一草案中与地震小区划有关的观点可概括如下：第一，应该区分地面破坏和强烈地震动引起的地震荷载两种不同性质的地震破坏作用。因此，“以宏观调查资料为基础的小区域烈度划分方法描述地震对不同土壤上的建筑物的宏观破坏现象是恰当的，但是用于新建工程地震荷载的计算则是不恰当的”^[12]。第二，场地土质条件对 $\beta(T)$ 的影响可以采用按场地土类别加以调整的方法。这一观点主要来自对当时可利用的强震资料的统计分析。利用在美国13个强震台取得的地震烈度为Ⅷ度以上的28个加速度记录，按台址土质软硬情况大致分为三类，计算了每类场地的平均 $\beta(T)$ 。结果表明，不同地基土上的 $\beta(T)$ 确实有所不同，而且这一不同可以较好地解释宏观震害经验^[13]。第三，不考虑场地类别对最大加速度 a 的影响。因为根据当时的强震观测资料看不出土质条件与 a 的相关性。设计 a 值可以直接由基本烈度和建筑物的重要性确定。在1964年规范草案的基础上完成了1974年试行抗震规范(TJ11-74)^[14]和1978年正式抗震规范(TJ11-78)^[15]。这两个规范有关设计地震动的规定与1964年草案无实质差别，它们都采用了与之基本相同的场地分类法确定设计地震动参数。

在这一期间我国发生了一系列破坏性地震，仅震级大于7.0的大震在1966—1976年的10年间就有9次。与场地条件的影响和场地分类有关的研究工作是密切联系震害宏观调查进行的，有下列进展：第一，取得了丰富的震害分布资料和工程地质资料，由此获得的主要启示包括：地基土愈坚硬震害愈轻，局部孤立突出的地形使震害加重，非发震断层对震害无明显影响^[16]。第二，发展了地表土层剪切波波速测试方法和土动力性能的试验研究^[9,17]。第三，联系震害异常分布对地基土分类方法作了若干初步研究^[17,18]。第四，就场地条件对地震动和震害的影响作了某些初步分析^[19,16,20]。

上述发展阶段的主要成果是在我国形成了较为合理的场地分类地震小区划方法：设计地震动参数可以在判别场地类型的基础上由地震区划图和抗震规范确定。就提供大量中小工程设计地震动参数而言，场地分类这一简便的地震小区划方法在当前和今后仍是可行的。当然，它的具体内容和方法将会随着地震区划图和抗震规范的改进而变化。此外，在这一发展阶

段,我国研究人员除了联系宏观震害现象对场地条件的影响作了若干有意义的研究外,还着手探讨复杂场地条件对地震动的影响的定量估计方法^[21]。同时,认真研究了国外有关强震地震动的工作,吸取了有益的观点和方法^[22]。对地震破坏作用的度量方法,特别是对地震烈度概念的变革及其应用作了系统的探讨^[23]。在70年代初期胡聿贤在未公开发表的一篇研究报告“地震烈度”中就讨论过强烈震动持续时间 T_d 对地震动破坏作用的重要性,指出抗震设计所需地震动参数除弹性反应谱 $SA(T)$ 外还应包括 T_d 。这一观点在70年代逐渐为我国更多研究者所接受。他还建议设计地震动的估计可以分为两步:先确定基岩地震动,然后再考虑地表土层的影响。这些为从70年代后期起在我国发展新的地震小区划方法作了准备。

(二) 第二阶段:统一考虑地震环境和场地条件的方法

70年代后期我国就开始了在统一考虑地震环境和场地条件的基础上进行设计地震动小区划的实践。迄今为止沿着这一新的方向已经在北京和大连等十多个城市完成了地震小区划。通过这一系列实践已经逐渐形成了符合当前认识水平的实现这一新方法的基本技术路线,这就是根据地震环境确定基岩地震动,然后估计局部场地条件对地震动的影响。新方法不是上述场地分类法(以下简称旧方法)的绝对否定,而是它的辨证发展。这一发展的关键是对地震输入的处理。两者的地震输入都是由地震环境决定的,但是,怎样表示小区划的地震输入和怎样估计地震输入,在新旧方法之间则有如下重要区别:

1. 地震输入的代表

旧方法的地震输入用全国地震烈度图提供的基本烈度表示。新方法的地震输入则为基岩地震动参数 $SA(T)$ 和 T_d ,或与之相应的地震动时间过程。这一发展不仅符合当前对地震动破坏作用的认识水平,而且使地震小区划的两个主要因素(地震环境和场地条件)紧密联系起来,从而促进了地质学家、地震学家和工程师之间的密切合作。新的地震输入表示方法既可以从生气勃勃的工程地震学研究中不断吸取有益的成果,又可以促进场地条件对地震动的影响的定量估计方法的发展。

2. 在估计地震输入时要不要考虑不确定性

根据地震环境估计地震输入包括两个环节:建立未来破坏性地震的发生模型和建立地震动(包括地震烈度)衰减关系。这对于新、旧方法是相同的。其区别在于旧方法基本上是确定性的,新方法则强调这两个环节的不确定性。究竟要不要考虑不确定性?我们看一看下面的例子。这就是有名的1971年美国加州圣费尔南多地震。这次地震所在区域的地质构造可以说是迄今为止世界上了解得最详尽的。早在1958年加州矿产部就发表了关于这一地区地质构造的专著,其中包括标有大量活断层的地质构造图。在发生1971年地震之前的几年内,由于几项主要水利工程开挖隧道的需要,又对这一地区的地质构造进行了广泛核查。同时,在这一区域内钻过大量油井,所以,对这一区域的地质构造掌握了非常丰富的资料。此外,这一区域是三所大学地质系学生实习的现场,若干批硕士和博士学位论文就是以研究这一地区的地下构造和活断层为论题。尽管有如此丰富的地质构造信息,1971年地震发生的位置却完全出乎预料。在这次地震中至少有11条地面断裂和构造断层相关。虽然其中7条在有的野外工作人员的笔记上做过描述,但并未为多数专家所接受,因此在任何公开发表的断层分布图上都没有这些断层;更重要的是另外4条(包括产生最大断层错动的一条)是预先完全不知道的。这个例子可以明白地说明当前中长期地震预报的水平。显然,在建立未来破坏性地震的发生模型时,即在判断潜在震源的空间分布和估计地震活动参数时应当考虑不确定性。应该指

出,考虑不确定性的新方法并不排斥确定性的旧方法。假定在某种情况下研究人员能够预报未来破坏性地震的位置和大小,我们只需要令在该位置发生该地震的概率为1,即新的不确定性方法包括了确定性方法。不过,即使中长期地震预报可以完全用确定性方式解决(实际上在今后相当长时期内可能性不大),近场地震动(包括地震烈度)的预报仍将有很大的不确定性。因此,在估计小区划的地震输入时努力反映对地震环境的认识的不确定性是新方法的一个显著特点。

四、新的设计地震动小区划方法

本节讨论新方法的两个基本环节——地震输入和场地条件对地震动的影响的估计方法,以及设计地震动小区划图的编制方法。

(一) 地震输入

地震输入目前常用基岩内竖直向上入射的剪切波表示。这是因为当前多数地震学家认为震源附近地区的地震动主要来自剪切波的贡献。由于地球介质的波速随深度增大,入射地震波按斯奈尔定律折射后在接近地表时入射方向趋于与地面垂直。基岩内竖直向上入射的剪切波可以用平坦的自由基岩地面的地震动(以下简称基岩地震动)确定。这是因为上述基岩入射波在任一点产生的振动与基岩地震动仅相差一常数因子2。基岩地震动加速度时间过程可以通过拟合设计基岩地震动参数 $[a, \beta(T)$ 和 T_d ,或 $a(T)$ 和 $T_d]$ 用随机合成的方法产生^[24]。用这种方法一般应产生一组加速度时间过程。这一产生方法优于Seed的方法^[25],因为用有工程意义的整个频段内的 $\beta(T)$ 描述地震动的频率成份优于仅用“卓越周期”描述。上述三个基岩地震动参数可用概率地震危险性分析方法按一定设防概率水平确定。这一方法是1968年美国C.A.Cornell首先提出的^[26]。它得到了广泛的支持并在细节上不断有所改进。基岩地震动参数的估计包括以下三个步骤:①建立地震发生模型;②建立基岩地震动参数衰减规律;③计算地震危险性曲线,并按一定设防水平确定设计基岩地震动参数。

1. 建立地震发生模型

(1) 潜在震源的划分 所谓潜在震源是指在未来一定年限内可能发生破坏性地震的地方。就地震小区划而言,潜在震源的划分就是勾划出对小区划范围可能产生破坏性影响的潜在震源的空间分布。这一空间分布是在综合研究地震活动性、地震地质和地球物理资料的基础上判断的。当前的主要判断依据仍然是:①历史地震的重复性,即在历史上发生过地震的地方同样强度的地震还可能重演;②地质构造类比,即在发震构造相似的地方具有同样的发震可能性。按照当前工程地震危险性分析方法对潜在震源区的要求,潜在震源区应当具有以下性质:每一潜在震源区遵循某一地震活动规律;同时,在每一潜在震源区内地震发生位置的空间分布是等可能的,即空间概率密度为常数。上述第一个性质要求潜在震源区应具有同一发震地质构造背景并且比较大,使我们可能利用该区内较多数量的地震资料较可靠地估计地震活动性参数;另一方面,为了反映地震发生空间分布的非均匀性,上述第二个性质要求潜在震源区应当比较小。合理地处理这一矛盾是划分潜在震源区的一个重要问题。

(2) 地震活动规律 它给出每一潜在震源区内破坏性地震发生次数的时间分布和每次地震可能具有的震级的大小分布。当前在工程上通常用泊松模型描述地震发生次数的时间分布,用震级-频度关系描述大小分布。因此,地震活动参数包括破坏性地震的年平均发生率、

震级上限和表示大小地震相对比例的 b 值。这些参数可以根据地震资料和地质资料估计。

潜在震源区的划分和地震活动性参数的估计都有很大不确定性。因此,应当考虑未来地震发生模型的各种可能的方案,分析地震输入的估计结果对这些方案的灵敏性和可能的变动范围,并采用合理的方法综合不同方案的估计结果。

2. 基岩地震动参数经验衰减规律的建立

基岩地震动参数通常指加速度反应谱(或峰加速度和峰速度)和强烈地震动持续时间。所谓基岩地震动参数的经验衰减规律,是指这些参数随震级和场地至震源距离的经验依从关系。由于在不同地区震源特性和地球介质的力学性质可能不同,地震动参数的经验衰减规律也可能不同。对于积累了较丰富强震观测资料的地区(例如美国西部),经验衰减规律通常直接用统计回归方法确定。但是,对于包括我国在内的世界上大多数地震活动区,目前只有很少的强震记录,而且这种状况在短期内很难改变。不过,在这些地区常拥有较丰富的地震烈度资料。因此,在建立这些地区的经验衰减规律时,除了应尽可能利用本地的强震记录外,根据本地的地震烈度衰减规律,利用外地地震烈度与地震动参数之间的转换关系是建立本地区基岩地震动参数衰减规律的一条重要途径(详见本书第四一六篇研究报告)。

3. 确定设计基岩地震动参数

根据地震发生模型和基岩地震动参数衰减规律可以确定基岩峰加速度 a 和峰速度 v (或一组具有不同周期 T 的 $SA(T)$) 的地震危险性曲线,这些曲线给出工程场地地震输入的全面的但不确定的描述。危险性一致的 a 和 v 的取值[或 $SA(T)$]取决于选取的设防概率水平。对于一般工程通常按50年超过概率10%设防,大致相当于复发周期为500年。对于重大工程可按更低的概率水平设防,例如,对于核电站和大型水坝常取设防的复发周期为 10^4 年。基岩 a 和 v 可以直接按设防概率水平和地震危险性曲线确定。设计 $SA(T)$ 的确定有两种可供选用的方法^[27]:一致危险性法和危险震源法。前者按照统一给定的设防概率从一组 $SA(T)$ 危险性曲线上直接取得设计反应谱 $SA(T)$ ^[39];或者根据危险性一致的基岩设防 a 和 v 值用本书第十五章提供的设计地震反应谱的双参数标定模型确定。显然,如此获得的 $SA(T)$ 并不是某一特定地震产生的,它是在给定的设防水平上综合反映了整个地震环境的影响。后者首先根据设防概率水平和地震动参数的危险性曲线判断一组危险的震源(包括远处较大地震和近处较小地震,在特殊情况下可以只考虑一个震源),然后按衰减规律确定 $SA(T)$,从而 $\beta(T) = SA(T)/a$ 。应该指出,用这一方法判别的危险震源与选用的地震动参数有关。我们建议分别用高频及低频的 $SA(T)$ (或者 a 和 v) 作为判别参数;不宜仅采用峰加速度 a 或地震烈度确定危险的震源。因为,用 a 作判别参数可能低估远处大地震的威胁,而用地震烈度作判别参数则难以区分近处较小地震和较远处大震的不同的地震破坏作用^[27]。设计基岩强烈地震动持时 T_s 可用类似于估计 $SA(T)$ 的方法确定。

(二) 场地条件对地震动的影响

1. 场地力学模型

详细研究小区划范围内的场地条件和建立合理的场地力学模型是估计局部场地条件对地震动的影响的基础,它包括以下工作环节:

(1) 工程地质条件查勘 组织有经验的专家小组进行现场调查,收集、分析和整理工程地质、水文地质和地形地貌的已有资料,并确定补充钻孔的数量和位置。一般情况下每平方公里应有2—4个钻孔点,最低不宜少于一个钻孔(包括已有钻孔和补充钻孔)。钻孔应尽

可能穿过第四纪覆盖层达到基岩或坚硬土层。如果客观条件使钻孔数量和深度难以满足要求,可以采用点(钻孔)面(地震折射、反射勘探或面波方法)结合的方法查清地表土层构造。但对典型场地应保证足够数量的钻孔点。这项工作的结果包括下列图件及其说明:钻孔地质柱状图、地面地形图、第四纪底板等深线图和典型工程地质剖面图。以上图件的比例尺应不小于地震小区划图的比例尺。

(2) 土动力学参数的测定 ①配合在典型场地上补充钻孔用检层法或跨孔法进行分层横波波速测量(见本书第十篇),绘制剪切波波速柱状图;②配合补充钻孔对典型场地不同类型、不同深度的土壤样本进行室内土动力学参数测试,取得包括非线性动力剪切模量和滞回阻尼比等土壤的基本动力性能参数(见本书第十一篇)。

(3) 将地质剖面转换为剪切波波速剖面 利用补充钻孔点兼有的工程地质资料和剪切波波速资料建立剪切波波速与土壤类型和深度间的经验转换关系。然后用这一关系将全部地质柱状和剖面图转换为剪切波波速柱状和剖面图。

(4) 建立场地力学模型 为了反映地震动在小距离内的变化,在进行地震小区划的城市或厂矿范围内应选取足够数量的地面运动控制点。它们一般与钻孔点一致,因为如前所述,后者可以代表各种典型场地条件并在小区划范围内大致均匀分布。估算控制点地面运动的力学模型可分为两类:一维剪切模型和高维力学模型。前者适用于地面、土层界面和土层-基岩界面较为平坦的控制点;后者适用于土层厚度变化或(和)基岩顶面起伏较大的控制点,对这些控制点不仅应考虑土介质的竖向非均匀性而且应考虑局部场地条件的横向非均匀性。以上两类模型的参数均由上述(1),(2)和(3)三小节讨论的三个工作环节提供。

2. 地震地面运动计算

根据地震输入和控制点的力学模型,我们可以用以下步骤计算各控制点的地震地面运动:首先按一维模型计算所有控制点的地面运动,然后对需要考虑横向非均匀变化的控制点用二维或三维模型进行校正。就一维剪切波模型而言,可以采用工程上常用的时域或频域的等效线性化解法(见本书第九章)。就高维模型而言,一般无法利用解析形式解答,但可以用直接数值方法求解。配置透射边界的有限元法是求解复杂场地高维问题的有效方法(见本书第十二至十四篇)。

(三) 设计地震动小区划图的编制

设计地震动小区划的最后一步是根据控制点地面运动计算结果提供便于工程应用的地震小区划图。就一般建筑而言,这类图件应能提供小区划范围内任一场地的地面 $SA(T)$ 。通常的做法是根据场地条件再将小区划地点划分为小区,并在每一小区内规定某种平均意义上的 $\beta(T)$ 和 α 。这种小区划编图方法有两个缺点:第一,在相邻小区的边界上设计地震反应谱的数值有突然跳跃,而这种跳跃通常没有物理根据;第二,每一小区内设计地震反应谱和该区内各地面控制点的地震反应谱之间的离散较大^[33]。我们认为,本节所述设计地震动小区划是在全面考虑地震环境和工程场地条件的基础上进行的,在这一基础上估算的各地面控制点的地震动已经综合反映了以上两方面的信息。因此,设计地震动小区划图可以直接根据估算的控制点地面运动参数进行编制,并不需要再一次将城市或厂矿按场地条件划分为小区和分区给定平均的设计地震动参数。我们建议设计地震动小区划的最终结果以两张小区划图给出,一张给出地面峰加速度的分布,另一张给出峰速度的分布。这两张分布图应根据各地面控制点的峰加速度和峰速度绘制,其结果可以用两种形式之一提出:第一种形式是等值线图。