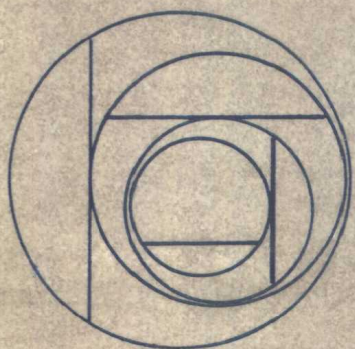


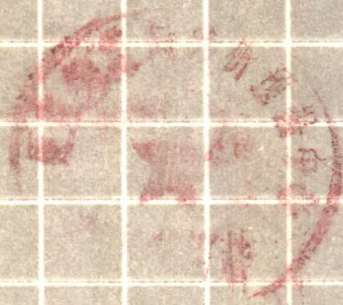
7782

56.2592



丁志俊 主编

# 城市地震小区划 及工程地震勘探



地震出版社

# 城市地震小区划及 工程地震勘探

丁志俊 主编

地震出版社

1991

## 内 容 提 要

全书由地震小区划和工程地震勘探两部分组成。第一部分较全面地介绍了地震小区划的工作原理、目的、意义以及具体实施方法，并着重提出了地震危险性概率分析法。第二部分重点论述工程地震中常用的方法技术，同时系统地介绍了表层微动的基本原理及其在抗震工程中的应用。书中援引了美、日等发达国家的部分实例，并附有百余幅插图可供读者借鉴。本书内容简洁、资料新颖，基本反映了国内外该两学科的现状和进展，是作者出国考察体验和多年工作实践经验的结晶。本书除适用于地震、地质矿产等部门的地震、地球物理工作者外，还可供冶金、建工、交通和能源等部门的工程技术人员及有关院校师生阅读参考。

### 城市地震小区划及工程地震勘探

丁志俊 主编

责任编辑：张锡濂

地 震 出 版 社 出 版

北京民族学院南路9号

三河县潮河印刷装订厂印刷

新华书店北京发行所发行

全国各地新华书店经营

787×1092 1/16 9.75印张 2 插页 226.5千字

1991年7月第一版 1991年7月第一次印刷

印数 0001—1550

统一书号：ISBN 7-5028-0468-4/P.300

定价：6.50元

## 前 言

当今社会，对新技术的需求日趋强烈。勘探地球物理的研究与应用更是充满勃勃生机，研究之深度与广度亦与日俱增。在城市扩建、核电站选址乃至工程勘查各个领域，地震勘探已为唯一常用的地面方法，而地震小区划对于城市抗震防灾又是必不可少的技术手段。在我国，从事工程地震及地震小区划研究和应用的人员、部门日益增多，同时也有不少好的著作相继问世。

为了更进一步推动该技术的发展和应用，使广大物探工作者知己知彼，更新知识，全面地了解本行业的进展及“外面的世界”，把握自我，呈现在您面前的这本书也就应运而生。编者希望这本书在某种程度上能为您“排忧解难”，提供借鉴。

本书由“地震小区划概论”、“浅震技术的过去、现在与未来”等6篇综述与“浅层地震反射在爱达荷州蛇河平原玄武岩勘查中的应用”、“地基地震响应分析方法的对比研究”等5篇国外技术文献组成。选题侧重于应用，兼顾其它。并本着博采众长、突出特色的宗旨，在选材和编写上不单纯追求新，而注重内容的系统性和连续性，在时间上有较大跨度。

本书共辑入11篇文章。内容翔实、取材广泛，既有理论、又有实例，既有国内进展、又有国外动态。特别注意收集和介绍国外常用方法与实例，力求反映当前国际上的研究、应用趋势及国内有关学者的成果。

本书以地质矿产部地球物理地球化学勘查研究所1990年度科研计划为基础，集编者近几年情报研究之成果，在大量分析、精选的基础上编写而成，试图对该学科的发展尽菲薄之力。希望能为更多的人所了解和掌握，更好地推广应用。

本书的出版得到地质矿产部地球物理地球化学勘查研究所地震室微震组的资助，并应约提供了部分稿件；在立意、组稿、编写过程中曾得到陈玉玺、郝大为同志的大力支持；傅学信、朱百成同志审阅了书稿并提出许多宝贵意见，在此向他们表示衷心的感谢。另外，还应该谢谢黄玉芳和白秀荣同志，是她们为本书绘制了插图。

应予以说明的是，本书专题综述引用国内外文献或资料较多，限于篇幅，不便一一列出其来源及出处，请读者见谅。

由于水平所限，书中难免有错误或不妥之处，恳请有关专家、同行和读者对本书提出宝贵意见。

编 者

1991年2月21日

# 目 录

## 前言

## 第一部分

地震小区划概论 .....	(1)
震害的防止与预测 .....	(15)
地基地震响应分析方法的对比研究 .....	(29)
地震灾害预测与损失估计若干问题的讨论 .....	(63)
琦玉县地震小区划调查报告 .....	(71)
地震危险性的分析计算 .....	(101)

## 第二部分

浅震技术的过去、现在与未来 .....	(110)
利用浅层反射法进行地基构造调查 .....	(120)
工程地震勘探方法技术 .....	(124)
表层微动的基本原理及在抗震工程中的作用 .....	(129)
浅层地震反射在爱达荷州蛇河平原玄武岩勘查中的应用 .....	(143)

# 地震小区划概论

朱百成

## 一、前言

地震给人类带来了巨大灾害，而中国人民遭受的地震灾害尤为严重。地震造成的人员伤亡，中国居世界首位。世界地震历史上死亡人数最多的一次地震在我国华县（1556年华县发生8级地震，死伤83万人），而在近代大地震中，死亡人数最多的一次地震也在中国（唐山）。

地震造成的经济损失，十分巨大。据近期我国对11次7级以上强震的不完全统计，仅房屋倒塌多达一亿多平方米。1976年的唐山地震，直接损失达百亿元，震后救灾和恢复重建也花了近百亿元。

世界各国关于减轻地震灾害的研究，不外乎为三个方面：一是控制地震，目前尚处于探索阶段；二是地震预报，我国和有些国家在这方面下了很大力量，但要准确地预报出一次地震的震级、时间和地点，在科学技术上尚未解决，目前仍处于研究阶段。而且，即使地震预报过关，也不能彻底解决地震灾害。例如，1975年2月海城发生的7.3级地震，由于震前成功地作出了预报，所以人员伤亡很少，但房屋建筑的破坏大约为2000多万平方米，地震造成的直接经济损失连同救灾和恢复重建约花了十多亿元。所以地震预报也不能彻底解决地震灾害，因而不少国家都把减轻灾害的重点转向抗震防灾。这就是第三个方面，我国在这方面有较成熟的经验，也取得了巨大的成就。

国内外近二十多年的抗震防灾经验使人们认识到，为减轻今后一个时期内可能发生地震所引起的灾害，就必须针对可能产生的地震破坏，作一个概略的然而科学的估计。例如，一个城市抗震加固标准的确定，投资计划和抗震救灾物资储备计划的制订、土地利用、老城改建、新城建设规划的编制等等，都应建立在对地震灾害的规模和形态以及地震引起的损失所作的科学估计的基础上。这就需要对该城市的地震危险性进行分析，给出不同水平的地运动发生率。还要进行地震影响小区划，对各个场地地运动强弱及运动特征，地震动可能诱发的地基失效等作出估计。在此基础上，根据对建筑、工程设施的分布和抗震能力的估计，作出震害预测，进行损失估计。然后依据科学的工程决策，来制订减轻地震灾害的规划。

由此可见，地震小区划的研究内容，在广义上应包括地震危险性分析、地震影响小区划、震害预测与损失估计以及抗震防灾规划四个方面的内容。由于篇幅所限，本文仅介绍前两方面内容，震害预测与损失估计将在本书中另文论述。

## 二、国内外地震小区划发展史

地震小区划方法在国内外的演化，大致可分为两个阶段。第一阶段，自50年代初至70年代中期，所使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，确定设计地震动的参数。

### 第一阶段、场地分类法

场地分类地震小区划方法又可分为早期和后期两个阶段。早期（50年代初至60年代初）按场地条件进行烈度调整地震小区划，而后期（60年代中至70年代中）则按场地类别进行地震小区划。

（一）50年代初至60年代初，国际上广泛使用的地震小区划方法为烈度调整法。该方法于1952年由苏联的麦德维杰夫首先提出。他认为地震小区划应在地震区划的基础上进行，考虑震源与传播特性，给出一个地区的烈度。他根据场地条件对地震烈度影响的许多实例，着重研究了地基土壤和地下水的影响，利用烈度增量 $\Delta I$ 的经验公式对烈度进行调整，调整后的烈度即为场地烈度。苏联1957年的抗震规范采纳了这一观点，并按此法在许多城市进行过地震小区划。我国和东欧许多国家也都采用了这种方法，如南斯拉夫在斯科普里市按该方法进行了小区划。我国在1959年由中国科学院土木建筑研究所主编的第一个抗震规范草案，就仿效了苏联的做法，并在北京进行了地震小区划。

该方法的优点是简单、明确、易行。其缺点是不能适应近代地震工程发展的需要。因为烈度只是一个粗略的概念，难以满足当前对地震动三要素振幅、频谱、震动持续时间的要求，而只能考虑振幅变化的影响。

（二）60年代中至70年中，国内外广泛使用的地震小区划方法为场地分类小区划。该方法以日本和我国开展较早。其根据主要是宏观地震震害经验，后来又补充了强震地震动记录分析的结果。所谓场地分类小区划即按场地条件进行地震小区划。此法认为小区域因素主要是场地因素，而小区域因素对地震动的影响又是通过场地类别来体现的。在抗震规范中是这样，在震害经验中也是这样。

我国地震小区划方法是在1964年左右提出来的。当时根据国际上强震记录的分析，发现不同场地上的地震动频谱有显著的变化，从而将场地条件的影响规定为是对设计反应谱形状的影响而不是对烈度或地震动振幅的影响。即场地土质条件对反应谱 $\beta(T)$ 的影响可以采用按场地土类别加以调整的方法，因而将过去的烈度小区划改为场地分类小区划，并在1964年的抗震规范草案试行过程中对我国的一些工程场地和城市进行过这种小区划。我们当时也将场地分为四类，以地基土壤的宏观描述为基础，并补充了一些场地的动力学指标如卓越周期、横波速度、地基承载力等。此法一直沿用至今，后来又补充了平均剪切模量作为参考指标。在1964年规范草案的基础上完成了1974年试行抗震规范 $TJ_{11}-74$ 和1978年的正式抗震规范 $TJ_{11}-78$ 。这两个规范设计地震动的规定与1964年的草案无实质差别，都采用与之基本相同的场地分类法确定设计地震动参数。此法的优点也在于简单，并可进而考虑场地条件对反应谱的影响。但将千变万化的场地条件简化为少数几个类别，是否足以反映场地对地震动的复杂影响，还是一个待研究的问题。

60年代和60年代以前，美国不大考虑场地条件对地震动的影响。他们认为在微小地震时，软弱地基与坚硬地基上的地震动确有差别，软弱地基的震动较大。但是抗震设计所考虑的主要是强地震动，而在强地震动下，软弱地基强度不足，无力传播过大的地震动，所以不同地基上的震动可能相差不大。这种观点只看到地震动的振幅，没有考虑到地震动

的频谱组成，是不全面的。到 70 年代，他们也明确提出场地土层的影响主要在于反应谱形状的改变。

1966 — 1976 年间，我国发生了一系列破坏性地震，仅震级大于 7.0 级的大震就有 9 次。为此，有关研究人员作了大量的震害宏观调查，取得了丰富的震害分布资料和工程地质资料，开展了场地条件对宏观震害的影响，复杂场地条件对地震动影响的估计等许多有意义的研究工作。在这一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。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。

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，地震危险性分析的研究和应用都取得了很大进展，并经历了确定性方法和概率性方法这两个阶段。在第一阶段（70 年代中期以前），只是把地震危险性当作一种确定性现象来处理，即不考虑地震条件在大小、位置和衰减上的不确定性，而把这些地震动参数当作确定的数值进行结构抗震设计。地震动观测资料和强震震害资料的大量积累，加上结构静力和抗风设计已过渡到以极限状态概率为安全度标准的概率设计阶段，从而推动了地震危险性分析的发展与应用。后一阶段（70 年代后期至今）则认为地震发生与地震动特性具有随机因素，必须用可靠性理论的方法去解决。因此，地震动以及震害影响的估计，如房屋的损坏与倒塌，工程设施的破坏，人身的伤亡与社会经济影响，均用一定的超越概率表示。沿着这一新的方向，经过近二十年的研究和实践，逐渐形成了符合当前认识水平的的基本技术思路，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。这种新方法不是对上述场地分类法（以下简称旧方法）的绝对否定，而是它的辩证发展。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，但怎样表示地震小区划的地震输入和怎样估计地震输入，两者却有重要区别。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，而新方法的地震输入则为基岩地震动参数  $SA(T)$ （绝对加速度反应谱）和震动持续时间。这一发展不仅符合当前对地震动破坏作用的认识水平，而且也使地震小区划的两个主要因素——地震环境和场地条件紧密地联系在一起。此外，在估计地震输入时旧方法基本是确定性的，新方法则强调不确定性。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。因为只要令新方法在该位置发生该地震的概率为 1，就变为确定性方法了。因此，新的不确定性方法也包括了旧的确定性方法。

### 三、我国地震小区划之现状

从上述地震小区划发展史中可以看出，美国、日本、中国代表了国际地震小区划水平。这三个国家均沿着上述新方向，在各自国家的许多城市完成了地震小区划。这些国家的研究内容和使用的技术方法基本上相同。因此，只需介绍我国当前地震小区划的现状，就可以窥见一斑。

#### （一）地震危险性分析

它包括建立地震发生的概率模型和地震动衰减规律以及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. 建立地震发生的概率模型

要分析一个地区的地震危险性，首先需要弄清该地区的地震活动性。所谓地震活动性指的是地震发生的时、空、强度和频度的规律。因此，建立地震发生的概率模型，应该包括潜在震源的划分和潜在震源地震活动规律两个环节。

**潜在震源划分：**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划分出对小区划范围内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、地震地质及地球物理资料的基础上判定的。当前国内外判断的主要依据仍然是：〈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。

**地震活动规律：**它可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，对地震活动参数包括破坏性地震的年平均发生率、震级上限以及表示大小地震相对比例的  $b$  值等参数的选取是地震活动规律中的核心问题。

#### (1) 潜在震源的划分

按照上述第一个环节，潜在震源区划分的主要依据是历史地震重演和地质构造类比这两点。主要问题是如何进行构造类比。众所周知，地震是地下能量积累到一定程度后突然释放的结果。但能量的累积和释放必然发生在某些特殊的部位，也就是发生在一些特殊的地质结构上。因此，研究这种结构是划分潜在震源的基本依据。对地质结构的研究，不外是以地质方法为主的野外调查和利用物探手段进行探测这两条主要途径。尤其是在地表露头较差和大面积覆盖地区，主要是应用地球物理方法查清地质构造。诸如地质构造轮廓的圈定，基岩断裂带的确定、松散沉积物厚度的测定（综合钻探进行）、覆盖隆起与凹陷的分布状态、岩浆岩的分布情况等。地矿部物化探研究所在连云港市中云开发区利用研究区域地质构造特征和地球物理异常场分布状态及地震活动性之间的相关关系，作为划分潜在震源区的依据。发现该地区的强震活动存在一定的规律性。它们与区域构造应力作用下的断裂构造运动密切相关，往往发生在一些具有特殊构造条件的区域，并具有明显的地球物理异常场。他们将强震活动的这些规律归纳成五条划分潜在震源区的标志，丰富了科学划分潜在震源方法的内容。

按照第二个环节（地震活动规律），在危险性分析中对潜在震源区的要求应具备以下特点：每一潜在震源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概率密度为常数。这是因为在危险性分析中，泊松模型和震级—频度关系中的参数，都是根据各潜在震源区内的历史地震数据来统计的。这样就限制了潜在震源不能划得太大，否则将没有足够的地震数据来统计这些参数。反之，如果潜在震源划得过大，由于泊松模型在空间上是均匀的（即地震沿潜在震源区均匀分布），则又将掩盖地震活动的非均匀性。如何克服这一矛盾是一个非常值得研究的课题。

为了解决这一矛盾，我们根据刘恢先教授在新的中国地震区划工作会议上提出的分两级潜在震源区的设想进行了研究，提出一级潜在震源在地质构造上联系紧密，可以作为独

立的地质构造单元。在震源区内历史地震成带成片。具有较高的地震活动水平，可以作为独立的地震活动统计单元。一级潜在震区的范围大小可介于通常的地震带与地震危险区之间。二级潜在震源区是在一级震源区内综合运用地质、地球物理及地震活动性等方面的知识，进一步划分的次级震源，即运用前述划分潜在震源标志所确定的潜在震源区。并以上海市金山卫一星火地区的地震危险性分析为例，将该地区划分为三个一级潜在震源区和九个二级潜在震源区。

## (2) 地震活动性参数的确定

前已阐明，建立地震发生的概率模型，主要包括潜在震源划分和地震活动规律的建立。而建立地震活动规律的关键问题是如何选取潜在震源的地震活动性参数。这里主要指表示大小地震相对比例的  $b$  值、震级上限和年平均发生率。

### (A) $b$ 值的确定

震级—频度关系式是地震危险性分析中最基本的关系，其参数代表了一个地区的地震活动水平和大小地震之间的比例关系，其关系式为：

$$\left. \begin{aligned} \log N(M) &= a - bM \\ \text{或} \quad \ln N(M) &= \alpha - \beta M \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots(1)$$

$a$  代表在统计区域内某时间段的地震活动水平； $b$  反映了统计区内某时间段内大小地震间的比例关系。由于它是实际地震资料的统计结果，所以与地震资料的完整性、可靠性、统计量的大小、起始震级、取样间隔及时、空范围等多种因素有关。由于历史地震记载受文化程度、居民点的分布及某些主观因素的影响，因而资料在不同时段也有不同程度的遗漏，直接影响了  $b$  值统计结果的真实性。因此，研究  $b$  值统计中的种种影响因素和使用较合理的统计方法，以便合理地选取  $b$  值是地震危险性分析中必须解决的问题。人们曾提出多种不同方法去确定这一参数。经对  $b$  值变化对危险性超越概率影响的研究，发现  $b$  值的改变对危险性超越概率影响不大，因而可以采用常用的最小二乘法或最大熵原则估算  $b$  值。

### (B) 震级上限的估计

确定一个地区或一个地震带的震级上限时，主要采用以下方法。

I、历史地震判别：在历史地震资料足够长的地区，可按该地震区（带）上已发生过的最大地震震级加 0.5 级的方法确定。

II、应变能积累速度判断：如已知该地震带的地震活动周期和平均释放速率，可以计算该带在一定时段内可能积累多大的应变能。

III、震级—频度关系分析：在一定地区内，大小地震具有某种比例关系。可以利用震级—频率关系式推出该地区的最大震级。

IV、极值分布：按冈贝尔 III 型极值分布，可以计算某一时段内可能发生不同震级地震的概率值。该带发生最大地震的概率和发生概率最高的地震可作为未来一定时段内最有可能发生的震级。

V、构造类比：地震大小和构造规模有一定关系。比如在同一大地震区内，从大地构造交接带、深大断裂、活断层、构造结点部位等可进一步类比外推。通常认为同样的构造条件可能发生同样大小的地震。

上述各种不同方法可以归并为历史地震方法、地质构造方法和极值分布方法三类。每

类方法均具有一定的根据和优点，但也有其缺陷。例如，由于缺乏足够长时期的历史地震资料和大震重复周期长，而使得仅使用历史地震法时，有可能低估其危险性。如唐山 1976 年 7.8 级地震前，历史上该地区从未发生过 7 级以上地震。反之，若仅使用地质构造法，则由于大震重复周期长（数百年至 1—2 千年），故在实际工程使用时限内可能不发生大震，从而高估其危险性。关于极值分布法，是基于对一定地区一定时段地震统计结果所得出的概率，可以作为该地区震情总趋势的某种指标，而对于所关注的最大震级来说，其真实性未必可靠。因为一般地震事件总是小震多、大震少，所以在某个短的时间段内，发生大地震的概率总是较小。众所周知，在进行工程建设、城市规划、抗震防灾等工作时，人们所关注的最大震级是在工程使用时限内可能遭遇到的最大震级，若不考虑时间因素，回答给定地区可能发生的最大地震几乎是不可能的。因为 100 年内发生的最大地震要比 10000 年中可能发生的地震通常要小得多。如果给定地区历史地震资料充分、记录时段较长，则采用以历史地震法为主，将震级—时间序列图（ $M-T$  图）划分为“平静期”和“活跃期”交替出现，并将“活跃期”划分为不同阶段，分析给定时段处于  $M-T$  图中的何期何段，从而估计出给定时间段内可能发生的最大地震。然后与极值分布方法及地质构造方法所得出的结果对比，综合确定。如果给定地区历史地震资料不够，记录时段较短，则补充地质和地球物理资料，利用贝叶斯统计方法进行权重分析。

值得指出的是，将历史地震  $M-T$  序列图划分为“平静期”和“活跃期”，在“活跃期”内再分时段，按不同期、段分析确定地震活动性参数，就是对泊松模型的时间上平稳和无记忆这两个缺陷的改进。

### (C) 年平均发生率的估算

通常的作法是按各潜在震源的实际地震发生次数除以记录年限。当采用两级潜在震源划分方案时，估算年平均发生率的关键是如何估算在一级震源区 A 发生一次地震时，该地震落在二级震源  $A_i$  的概率  $P_i$ 。对  $P_i$  估算时亦需根据历史地震数据充分与否采用不同的方法。当历史数据足够多时，可利用贝努利试验确定  $P_i$ ；当历史数据不充分时，则需要补充地质和地球物理数据，利用贝叶斯方法确定  $P_i$ 。

### 2. 地震动衰减规律和破裂长度与震级关系的建立

在危险性分析中，除了需要地震发生的概率模型外，还需要建立地震波在传播过程中地球介质的影响。若用  $Y$  表示地震动参数（如加速度、速度、反应谱、烈度等）， $E$  表示震源参数（如震级、地震矩等）， $R$  表示途径参数（如场址到震源的距离等），则估算给定场地的地震动可采用如下衰减关系：

$$Y = y(E, R) \dots\dots\dots (2)$$

建立这一关系式通常有三条途径。一是根据给定地区足够多的已有强震观测资料，通过回归的方法建立某种经验关系式；二是建立理论模型进行理论推导，但目前尚未能用于实际工程；三是通过宏观烈度资料估算所需要的地震动衰减规律。对于世界大多数国家（包括我国），目前只有很少的强震记录，但都有丰富的烈度资料，因此只能采取第三条途径。首先求出烈度衰减规律，然后再把烈度衰减规律转换成地震动衰减规律。

#### (1) 烈度衰减规律

烈度衰减规律可采用不同形式的关系式来表示。通常采用的关系式为：

$$I = b_0 + b_1 M - b_2 \ln(R + R_0) + c_1 \dots\dots\dots (3)$$

式中  $b_0, b_1, b_2$  系数可根据等烈度线资料, 用回归分析的方法确定;  $R_0$  可以是大于零的任意常数;  $R$  代表某种定义的距离参数, 如可以代表震源距, 震中距或场地到破裂线两端的平均距离等等。当  $R$  代表震中距时, 引入常量  $R_0$  很有必要。因为在  $R_0=0$  的条件下, 当  $R$  趋于零时, 烈度将无限增大, 这显然是不合理的。  $\varepsilon_1$  是均值为零的随机变量, 故当  $\varepsilon_1=0$  时, 所得衰减关系为均值估计。

### (2) 地震动衰减规律

当给定地区缺乏强震观测资料, 但有等烈度线资料时, 烈度衰减公式 (3) 可改写为:

$$I_B = b_0 + b_1 M + b_2 \ln(R + R_0) + \varepsilon_1 \dots \dots \dots (4)$$

并假设待求的地震动衰减公式为:

$$\ln Y_B = b'_0 + b'_1 M + b'_2 \ln(R + R_0) + \varepsilon'_1 \dots \dots \dots (5)$$

然后利用某地区已有的强震观测资料和烈度资料, 经回归分析得出经验公式则为:

$$I_A = a_0 + a_1 M' + a_2 \ln(R' + R'_0) + \varepsilon_2 \dots \dots \dots (6)$$

$$\ln Y_A = a'_0 + a'_1 M' + a'_2 \ln(R' + R'_0) + \varepsilon'_2 \dots \dots \dots (7)$$

若假定两地震级相同, 即令  $M = M', I_B = I_A, Y_B = Y_A$ , 然后解联立方程, 消去  $I_A$  和  $\ln(R + R'_0)$  即得:

$$\left. \begin{aligned} b'_0 &= a'_0 + \frac{a'_2}{a_2} (b_0 - a_0) \\ b'_1 &= a'_1 + \frac{a'_2}{a_2} (b_1 - a_1) \\ b'_2 &= \frac{a'_2}{a_2} b_2 \\ \varepsilon'_1 &= \frac{a'_2}{a_2} (\varepsilon_1 - \varepsilon_2) + \varepsilon'_2 \end{aligned} \right\} \dots \dots \dots (8)$$

若  $\varepsilon_1, \varepsilon_2$  和  $\varepsilon'_2$  相互独立, 则  $\varepsilon'_1$  的方差为:

$$\sigma'^2_1 = \sigma'^2_2 + \left(\frac{a'_2}{a_2}\right)^2 (\sigma^2_1 + \sigma^2_2) \dots \dots \dots (9)$$

其中:  $\sigma'_2$  和  $\sigma_2$  分别为外地区加速度和烈度衰减公式 (7) 和 (6) 两式的均方差,  $\sigma'_1$  和  $\sigma_1$  分别为给定地区的加速度和烈度衰减公式 (5) 和 (4) 两式的均方差。当  $\sigma'_1=0$  时, 不考虑  $\varepsilon'_1$  项, 则公式 (5) 可给出平均衰减关系。

### (3) 破裂长度与震级关系式

在地震预报或烈度评定中, 人们有时使用地面上观察到的发震构造段的长度推断未来可能发生的最大地震震级。在地震危险性分析的概率法中, 若采用断层破裂模型, 就需要建立破裂长度与震级之间的关系。国内外通常采用的方法有: ①按地表破裂长度与其对应的地震震级进行统计; ②按一定时段内余震区的分布范围进行统计; ③把Ⅷ度烈度区等震线

的长轴或长短轴之差的长度视为破裂长度。这些方法均存在较大缺点，很难统计准确。因为：(A) 地表的破裂长度显然小于实际的破裂长度；(B) 余震区随时间的变化而变化；(C) 将地表Ⅷ度区等震线的长轴或长短轴之差的长度视为破裂长度，则缺乏应有的根据。

另一方面，由统计得到的等震线的长短轴等诸参数是地震断层破裂方向和长度、地震能量释放及地壳介质传播特性等在地表的实际反映。因此，若利用统计实际破坏得到的椭圆等震线即等烈度线的长短轴与虚拟破裂长度之间的关系，即可求出断层破裂长度与其对应的地震震级之间的关系式。应该说此方法比上述三种方法更符合实际。

值得指出的是，按实际等震线长短轴与虚拟破裂长度所求出的破裂长度与震级之间的关系式与地区有关，地区不同其关系式也不同。因为实际等震线长短轴的长度以及地震能量释放、地球介质传播特性等均与地区有关，这也正是它比较符合实际的原因。

### 3. 危险性概率计算

危险性分析的目的，在于计算给定场地在未来不同时间段内可能遭遇的地震动参数的概率分布。因此，除研究地震发生的概率模型、地震动衰减规律外，还需要研究与地震发生的模型相适应的危险性计算模型。对该模型的意见及其修改方案，见本书“地震危险性的分析计算”一文。

## (二) 地震影响小区划

地震影响小区划包括场地工程地质勘察、地面运动分析和地震小区划及其图件的编制等三个方面的内容。下面对其分别作一论述。

### 1. 场地工程地质勘察

场地工程地质勘察是分析估算场地条件对地震动影响和地面破坏小区划的基础工作，其主要环节是钻探和土力学参数的测定。

#### (1) 土力学参数的测定

国内外的震害统计资料表明，土层的剪切波速度和覆盖层厚度（简称土层厚度）对建筑物的震害有重要影响。因此，在场地土分类和反应谱计算中都采用它们作为计算参数。为考虑土层厚度的影响，首先遇到的问题是如何定义土层厚度。从地震波传播的观点出发，岩土界面应该是地震波传播过程中的一个强反射面，此界面以下基岩的振动刚度( $\rho \cdot V_s$ )要比上部土层的相应值大很多，因为岩土介质密度 $\rho$ 的变化相对较小。通常的做法是，当下层的剪切波速度 $V_s$ 为上层 $V_s$ 的二倍以上，且下面再无软夹层时，该土层就可以看作是基岩。覆盖层厚度的这一定义相对来讲是比较明确的，但使用起来仍有一定困难，因为实际场地有时难以达到，故改成绝对刚度 $V_s$ 来代替上述覆盖层厚度，即将基岩定义为剪切波速度 $V_s > 500\text{m/s}$ 的土层或岩层。

其次是如何取得基岩以上土层的剪切波速度和密度资料。通常采用的方法是，利用PS波速层检法观测土层的 $V_s$ 和通过钻孔取样测定土层的容重而获得。这里存在的主要困难是，(1) 地质基岩强风化层不能作为基岩，因为强风化层的 $V_s < 500\text{m/s}$ ，所以PS测井孔必须穿过强风化层；(2) 当场区第四系土层较厚时，定义的基岩埋深通常为百米左右。同时，为能较准确地了解场区土层的动力学性质，每平方公里至少需有一个钻孔的 $V_s$ 和 $\rho$ 资料，这就得花费大量的人力、物力来进行钻探。为了减少钻探费用，人们通常采用较少数量的浅孔观测 $V_s$ 和 $\rho$ ，通过回归分析的方法建立不同类型土质的 $V_s$ 与土层

深度经验关系式，然后外推到至深部土层及原有钻孔，计算出  $V_s$ 。为了检查外推结果的精度，我们提出了以下两种方案：(1) 按工程地质单元布设深孔，钻至基岩的风化层以下，实测各土层的  $V_s$  和  $\rho$ ，然后与计算的  $V_s$  与  $\bar{\rho}$  进行对比；(2) 利用表层微动勘查地层结构所得结果与利用计算出的  $V_s$  所得的卓越周期进行比较。

## (2) 工程钻探

为查明场地地层结构，不良地质现象的成因与分布范围以及场地和地基的稳定性等，需要大量的钻孔。众所周知，钻探的费用是相当高的。尤其对一个城市而言，若按每平方公里布置一口钻井计算，则不下数百个孔。因此，如何勘查工程场地地质条件，很值得研究。它不仅具有较高的经济效益，同时也有其一定的学术意义。在这方面，地质矿产部已做了许多试验性工作，并取得了很好的效果。如采用多种物探方法对工程场址进行勘查，既能达到节约经费的目的，又能满足工程地质勘察的需要。

## 2. 地面运动的分析

它主要包括估算参考点地面运动的力学模型和地震输入两个环节。一般而言，力学模型可分为一维剪切模型和高维力学模型，前者适用于地面、土层界面和基岩界面较为平坦的场地，后者则适用于土层厚度变化大或基岩顶面起伏较大的场地。对地形起伏较大的场地，通常采用一维模型计算，而用二维模型进行校正。

### (1) 地震输入

在许多情况下，地震对地面运动可以主要归因于剪切波自下卧岩层（基岩）的向上传播。若能合理地给出下卧岩层的运动，则通过计算就能获得给定条件下的地面运动时程和特征。关于下卧岩层的运动，可以用两种方法获得。一是通过强震记录，此法虽说理想，但困难较多。因为能满足要求的强震记录数量毕竟有限，难以满足各方面的需要。另一种方法则是人工合成加速度时程曲线。由于人工合成地震波可以按人们的需要而设计，因此越来越受到人们的重视。这一途径可采用比例法和数值法这两种方法，应用最为普遍的是后者。

比例法：1969年由席德首先提出。作法是先选择一个地质、地震条件及地震动参数尽量符合各项要求的地震动记录，若地震动参数不完全符合要求，则将时间座标  $t$  与加速度座标  $a$  分别乘以适当常数，使其满足各项要求。但此法可供调整的参数仅有两个比例常数，所以只能满足最大加速度与卓越周期的要求。

数值法：又可分为三角级数法、随机脉冲法与自回归法这三种形式，而以三角级数法应用最为普遍。其基本思想是用一组三角级数之和构成一个近似的平稳高斯过程，然后乘以强度包线，以得到非平稳的地面运动加速过程。由于近十几年来，人们认识到对工程抗震而言，地震动的特性可通过地震动的峰值、频谱和振动持续时间这三要素来描述，因此，在地震加速度时程模拟中，一般要求控制此三要素，即峰值加速度  $a_{max}$ 、加速度放大倍数反应谱  $\beta(W)$ ，强度包线  $f(t)$ 。常用的模型是，

$$A(t) = f(t) \cdot a(t) = f(t) \sum_{k=0}^N C_k \cos(W_k t + \varphi_k) \dots \dots \dots (10)$$

其中： $\varphi_k$  为  $(0, 2\pi)$  区间内均匀分布的随机相角； $C_k$  与  $W_k$  分别为第  $k$  个频率分量的幅

值和频率。强度包线  $f(t)$  取如下形式,

$$f(t) = \begin{cases} \left(\frac{t}{t_1}\right)^{\lambda_1} & \text{当 } 0 \leq t \leq t_1 \text{ 时} \\ 1 & \text{当 } t_1 \leq t \leq t_2 \text{ 时} \\ e^{-\lambda_2(t-t_2)} & \text{当 } t_2 \leq t \text{ 时} \end{cases} \dots\dots\dots(11)$$

其中, 系数  $\lambda_1$  为  $(0, t_1)$  区间的递升系数,  $\lambda_2$  为  $t > t_2$  的衰减系数,  $t_1, t_2$  及  $t$  分别表示振幅上升时间、振幅下降的起始时间及地震动持续时间。

三角级数各分量幅值的初值由功率谱函数  $S(W)$  与反应谱  $S_a(W)$  的关系给出,

$$C_k = [4S(W_k) \cdot \Delta W]^{\frac{1}{2}} \dots\dots\dots(12)$$

其中,  $\Delta W = 2\pi / T$ ,  $W_k = 2\pi k / T$ ,  $T$  为随机过程  $a(t)$  的总持时。

为将加速度反应谱作为模拟的目标, 如利用反应谱与功率谱的近似转换关系, 则有,

$$S(W) = \frac{\xi}{\pi W} \cdot [S_a(W)]^2 \cdot \frac{1}{\ln\left[\frac{-\pi}{WT} \ln(1-P)\right]} \dots\dots\dots(13)$$

式中,  $S_a(W)$  为给定的目标加速度反应谱;  $\xi$  为阻尼比;  $P$  为反应超越概率。

因此, 我们只要给出某设防水平超越概率的地震动参数, 便可人工合成加速度时程。

### (2) 地表土层地震反应的计算

对非线性土层地震反应的计算, 通常采用等效线性化的解法。即在真实地震波穿过土层时, 土体承受极不规则的循环荷载, 在应力应变平面上, 非线性土层地震反应的应力应变关系呈现复杂的回线图象, 各个回线的大小、形状和方位都是变化的。作为一种简化的处理方法, 就是在平均的意义上用一条等效的稳态回线近似地表示所有回线的平均关系。这条回线的应变振幅被称为等效应变振幅  $\bar{\Gamma}_n$ , 一般取各土层的  $\bar{\Gamma}$  为:

$$\bar{\Gamma}_n = 0.65\gamma_{n,max} \dots\dots\dots(14)$$

式中,  $\bar{\Gamma}_n$  表示第  $n$  层土层的等效应变振幅;  $\gamma_{n,max}$  表示第  $n$  层土层中点剪应变暂态反应的最大值, 由土样动力性能试验结果给出。

$$\left. \begin{aligned} \bar{\mu}_n &= \bar{\mu}_d(\bar{\Gamma}_n)\mu_n \\ d_n &= d(\bar{\Gamma}_n) \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots(15)$$

$\bar{\Gamma}_n$  作为  $\bar{\mu}_d$  和  $d_n$  的经验函数由土样试验结果确定, 由 (14) 式便可确定  $\gamma_{n,max}$ 。

### 3. 地震影响小区划及其图件的编制

地震影响小区划通常可按其不同作用而分为两类, 即地面破坏小区划和设计地震动小区划。前者可用于制定城市或厂矿的土地利用规模、工程场地选择和地基土处理方案的制

定以及预测因地面破坏产生的震害；后者则用于向抗震和减震设计、抗震加固以及预测结构振动破坏提供地震输入。地震小区划图件亦相应地分为两类，即为地面破坏小区划图和设计地震动小区划图。下面分别作一论述。

### (1) 地面破坏小区划及其图件

地面破坏小区划包括地基失效，地面破裂，断裂带的影响这三方面内容。

#### A. 地基失效

许多宏观震害调查表明，在某些条件下结构物的破坏并不由地震荷载控制，而是地基失去承受上部荷载的能力造成的，即所谓地基失效。地基失效是在强烈地震作用下丧失或降低承载力的现象，它的产生不仅取决于外力作用的大小、特征和持续时间等因素，还与地基本身抗失效的能力有关。因此不管地基软或硬，只要外部产生的荷载超过地基自身的强度或产生了上部结构不能允许的变形就会出现地基失效现象。为此，应根据工程地质勘察结果将分布范围、严重程度等圈划出来，编制地基失效图。经常出现的地基失效现象有软弱地基的震陷、饱和砂土液化、坚硬地基的滑移和崩塌。对前两种地基失效现象，人们普遍比较重视，而对硬地基的失效现象，往往容易被人们忽视。这是因为坚硬地基在通常静力作用下具有足够的强度和较小的沉降变形，因而可以认为是稳定的。但在强烈地震作用下，就可能出现整体或局部的失稳。这种失稳往往与其不均匀的成层条件或各向异性在地震动中表现出来的强度不足有关。山区地基在地震时发生的问题多属这种类型。因为山区基岩起伏，第四系厚度变化多端。一般地基虽较坚硬，但由于地形复杂，陡坎斜坡与断层破碎带及构造节理、裂隙等纵横分布，使场地地基中存在着极不协调的内在因素，构成了强度上的明显差异。

#### B. 地面破裂

隐伏断裂能否在未来的一次强烈地震发生地表错动，这是在工程选址和土地利用规划中普遍关注的一个极其复杂的问题。因为它包含了很多不定因素，给具体工作带来许多意想不到的困难。当前国内外判断断裂错动的可能性，主要采用经验判别的方法。

##### i. 地表断裂的出现与震级的关系

国内外许多研究工作者对历史地震和现今地震的震级大小与地表破裂进行统计，得出许多地表破裂长度  $L$  与震级  $M$  的关系式，这些关系式基本相同。利用  $L$  与  $M$  关系式可以得出出现地表断裂的最小震级一般为 6 级以上。

##### ii. 地表断裂的出现与覆盖层厚度的关系

覆盖层相对于基岩来说具有较大的塑性，当具有一定厚度时就可以经受下部基岩的错动，而不致在地表出现与基岩断裂连通的裂缝。当然，这与基岩断裂错动位移大小、方向等有关，可用公式表示如下：

$$H_c = \frac{D}{\epsilon_c} \dots\dots\dots(16)$$

式中： $H_c$  表示覆盖层的临界厚度，当覆盖层厚度超过此厚度时，下部基岩的错动一般不会导致在覆盖层表面产生与基岩错动贯通的裂缝； $\epsilon_c$  为覆盖层的剪切破损应变临界值； $D$  为下部基岩错动位移。国内外对地震断裂及其错动位移量的统计结果表明，这些一般都在覆盖层厚度小于 50m 的情况下发生，而错动位移约在 2—3m 的情况下产生，这与公式 (16) 的计算结果一致。



### iii. 地表断裂可能出现的范围

在工程选址及总体规划设计中，对于地震区可能出现地表断裂的范围是十分关心的。尽管断裂发生的可能性从震级大小和覆盖层厚度可作出统计学的估计，但具体位置有时却难以预知。因而对于强震区的这种断裂，应尽可能使重要工程设施避开。然而，地质图上的断裂线位置精度，往往难以适应工程总体规划及平面设计的精度要求，因此，具体确定原生断裂带的宽度，则宜视地质测绘勘探及成图精度、断裂的地质力学特征和岩层破碎程度等因素而定。

一般地说，地表断裂出现的具体位置，在基岩错动面斜上方的可能性最大。因此，在有充分资料的地区，根据发震断裂的具体部位，来圈定未来一次强烈地震可能出现的地表断裂的范围是可能做到的。

### C. 场区内断裂带的影响

上面讨论的因发震断裂错位而产生的地表裂缝，可以认为是一种地基失效现象。这里要讨论的是场地内已经存在断裂并构成一种场地条件，因而要研究它对工程抗震有何影响。从工程地质观点来看，断裂的影响主要是指断裂活动性的影响，而所谓断裂活动性从地震工程的观点来定义，可区分为以下三种活动。

#### 升降运动

指一个构造单元整体性连续变形。由于变形的连续性和时空范围广阔，故对一般范围有限的工程设施影响不大。

#### 蠕动

蠕动是指断层两翼岩层的相对位移。它在时间因素上可能是连续的，而在变形的几何特征上则是不连续的，而且在效果上一般不直接产生地震，这也是它与错动的本质区别。断裂蠕动对工程设施的影响，主要是对其接触的工程设施产生缓慢的静力破坏。对于这种破坏可以采取静力作用下的结构措施加以预防或补救。此外，如果在基岩上有一定厚度的覆盖层作为地基，那么由于土壤本身具有蠕变特性，可以部分或全部地抵消断裂的蠕动位移影响。因为蠕变是在应力为常值的条件下产生的应变，所以如果说断裂的突然错动是大量释放应变能的话，那么断裂的蠕动就正好能吸收这些应变能而解除应力。这也是某些断裂错动与蠕动的相互关系，就此而言，蠕动对错动是起着某种减缓作用。

#### 错动

错动是指岩层突然产生的不连续变形。变形不仅在时间因素和几何特征上表现出其不连续性，而且还具有不可逆性，其效果就是产生不同强度的地震。关于发震断层对震害的影响问题，过去和现在都存在着两种截然不同的观点。一种认为，虽然宏观震害调查结果不一，但在发震断层剪切带内，建筑物除可能遭受震动破坏以外，尚有可能遭受由于剪切力造成的破坏。总的来讲是增加了该地带内的地震危险性，而且这两种危险性的概率一般具有同样的数量级，因之对带内的建设应加以干预和控制。而对于非发震断层，后一种观点认为只要不与发震断层相交汇，对一般建筑物暂可不考虑其影响。

关于地面破坏小区划图件的编制，应根据实际场地工程地质勘察结果分别给出地基失效小区划图，地面破裂小区划图及场区断裂影响小区划图。

### (2) 设计地震动小区划及其图件

众所周知，地震造成的严重灾害主要是强烈的地震动引起的结构破坏和倒塌造成的，