中国地震灾害损失预测研究专辑

（四）

地震灾害及损失预测方法

尹之潜 著

地震出版社

国家地震局震害防御司资助

中国地震灾害损失预测研究专辑(四)

地震灾害及
损失预测方法

尹之潜 著

地震出版社

1996

内容提要

本书系统叙述了预测地震灾害和损失的基础理论及实用方法；建立了确定各类房屋建筑震害矩阵的统一方法，并提出由于经济的发展，房屋建筑数量和质量变化对未来一个城市或地区震害矩阵的动态进行分析的方法；给出了各类房屋在不同烈度的地震时，单体和群体发生某种破坏程度的概率计算方法和现有各类建筑的震害矩阵，直接经济损失和间接损失的分析方法，人员伤亡和无家可归人员的估计方法，次生灾害的估计，减灾对策的经济效益分析方法；以及震害预测应包括的内容和工作步骤．这些方法在国内很多城市和地区已得到了广泛的应用．

本书可供从事防灾、地震灾害预测、地震工程、保险和制定防灾措施的有关人员阅读，对各级防灾机构和政府管理人员也有参考价值．

中国地震灾害损失预测研究专辑(四)

地震灾害及损失预测方法

尹之潜　著

责任编辑:李　玲

1996年4月第二次印刷

印数: 1001～1500

ISBN 7-5028-1258-X / P・789

(1688)　定价: 10.00 元

目　　录

第一章 概 论

从本世纪初，人类在建造房屋时开始采取了抗震措施，这是人类在建造房屋时有意识地提高房屋抗震能力的开始。在这半个多世纪里发展和完善了建筑抗震设计规范。由于房屋建筑在地震作用下的反应分析理论的发展，新建结构抗御地震的能力也不断在提高；同时科学家们也意识到在不断提高新建筑抗震能力的同时，必须对现有的建筑的抗震能力和潜在的危害进行估计；对不满足抗震要求的建筑进行改造和更新，并制订综合防御对策，以提高城市的综合抗震能力；这就促使了抗震鉴定和震害预测的发展，也是减轻地震灾害的重要途径。1968 年日本十胜冲地震中钢筋混凝土结构破坏很多，震后(1977 年)SPRC 委员会编写了钢筋混凝土结构耐震诊断法，检查现有钢筋混凝土结构的抗震能力，对不满足要求的结构采取加固措施。1966 年邢台地震后，1967 年我国制订了房屋建筑抗震鉴定标准(草案)，并对北京地区的部分房屋进行了抗震鉴定。要制订全面的减灾对策必须对未来地震可能造成的灾害和损失进行估计，这是很关键的一项工作。美国国家海洋局和大气管理局与美国地质调查局在 70 年代首先对旧金山、洛杉矶、普查特桑和盐城开展了地震灾害损失预测的研究。1977 年美国政府颁布了“国家减轻地震灾害法”，是国家参与组织实施减灾行动的一个重要步骤。1989 年在美国地震工程委员会领导下的“地震损失估计专家小组”提出了“未来地震损失估计指南”，做为指导美国地震灾害预测工作的重要文件。与此同时，日本对大阪市和静冈地区未来地震灾害损失进行了研究。我国从 1978～1987 年先后分三批确定了 52 个抗震重点城市，并开始在这些城市进行震害预测工作和制订防灾规划。1990 年在国家地震局震害防御司领导下的“未来地震灾害损失预测研究组”出版了《中国地震灾害损失预测研究》一书，给出了未来 50 年我国地震灾害可

能造成的损失。近几年，我国已建立了各类房屋建筑的震害预测方法和计算软件，并在不断完善而且应用于实际地震评估。

地震灾害损失预测是一门新的科学，它要解决的问题，是对一次地震或一个地区在预定的时期内人工建筑可能遭受到的地震破坏、人员伤亡和由此引起的经济损失的定量估计。它是制定防灾规划和防灾投入的主要依据。抗震鉴定是根据国家或部门制定的标准，对要鉴定的建筑逐项进行检查，是被检查建筑进行抗震加固的依据。它与震害预测都是为了制订减轻地震灾害对策的前期工作，有相似之处，但又不完全相同。在使用其结果时应注意它们的区别。

我国地处欧亚板块的东南部，受太平洋地震带和喜马拉雅山–地中海地震带的影响，地震活动较频繁。本世纪来在我国发生 6 级以上地震 600 余次，平均每年发生 6 级以上地震达 6 次之多。在我国地震烈度区划图上 7 度和 7 度以上的地区面积达 $312\times10^4km^2$，占国土总面积的 32.5%；全国有 136 个城市位于 7 度和 7 度以上的地震区，约占全国城市总数的 45%。这对我们的经济建设和人民生活是一大潜在威胁。目前人类尚无法控制地震的发生，要减轻地震的威胁只有在工程和社会方面采取防御措施。例如，在工程方面，对新建工程严格按抗震设计规范要求设计、施工；对不满足抗震要求的原有工程采取加固措施；对老旧危房做出更新规划等。在政府和社会方面，建立和完善减轻地震灾害工作体制；制订应急措施规划，次生灾害防御规划；建立救灾指挥体系；加强人民群众的防灾意识教育等。经验证明，采取了这些措施就可提高抗御地震的综合能力，减轻地震灾害。在制订上述各种对策之前应对本地区潜在的地震灾害损失进行定量估计。做为制订减灾对策的依据，它对领导决策和优化地震工作布局还有下列的意义：

(1)区域的地震灾害预测，可为各级政府制订防御地震灾害对策，决定防灾投入和地震保险提供定量的依据。

(2)全国性地震灾害预测，可为国家优化防灾投入和合理布局前兆台站提供依据。在中国这样一个幅员广大而地震多的国家，防灾投入和地震台站的布局应首先考虑未来地震灾害严重的地区，因此地震损失预测为这两项工作的优化提供了依据。

(3)为选定地震重点监测区提供参考背景。选定地震重点监测区首先应考虑具备有潜在灾害、有监测台站和中期地震前兆显示的地区。

(4)为快速评估和地震预报提供依据。

地震危险性分析、结构抗震理论和地震灾害损失预测已经形成地震工程的三个支柱。地震灾害损失预测是它们中最年轻的一个学科，它涉及到地震学、工程学和经济学。图 1.1 可以说明它涉及到的内容和对减轻地震灾害工作的意义。

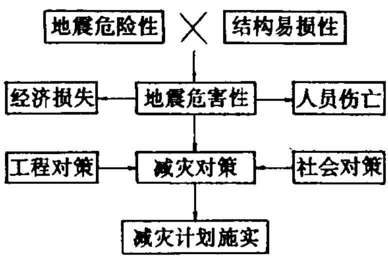

图 1.1　地震灾害损失预测内容及意义流程图

第二章　概率论基础理论[1]

第一节　概率论基本概念

预测地震灾害损失涉及到地震学，工程学和社会经济学。这三门学科在实用上都具有很大的不确定性，如地震发生的时间、地震的强度和发生的地点，工程的施工质量和建筑材料的强度，社会财富和商品的流通等都具有不确定性。所以在研究未来地震可能造成的损失时，应建立在概率理论的基础上，用概率方法研究和叙述地震灾害损失。

自然界和社会发生的现象可以分为两大类。一类是在一定条件下必然发生的，例如，向上抛一石子，石子到一定高度后必然下落，比重小于水的物体放入水中一定浮起等。这类现象在概率与统计学中称为确定性现象。另一类是事先无法确定结果的，例如，在相同的条件下抛同一枚硬币，其结果可能是花面朝上，也可能是数字面朝上，在每次抛掷之前无法确定抛掷的结果；同一人掷一枚骰子，在掷前无法知道掷后出现的点数；在相同的条件下制做一组混凝土试块，经试验机试测后，它们的抗压强度并不完全一样等，这类现象称为不确定性现象。这种现象虽然就每次试验或观察结果来说，它具有不确定性，但在大量重复试验或观察下，它的结果却存在着某种规律性。例如，多次重复抛一枚硬币得到花面朝上和字面朝上大致各占半数；在相同条件下，制做数组混凝土试件其抗压强度按照一定规律分布，这种规律性称为统计规律性。一种现象，在个别试验中呈现不确定性，但在大量重复试验中，却具有统计规律性，称之为随机现象。概率论与数理统计是研究随机现象规律的一门科学。

一、随机试验

试验在这里是一个广泛的术语，包括各种科学试验和对某一事物的某一特征的观察。

例如，T_1 表示抛一枚硬币，观察花面Z、字面F出现的情况。

T_2 表示一颗骰子，观察出现的点数。

T_3 表示一口袋中装有红、白两种颜色的乒乓球，从袋中任取一只球，观察其颜色。

上面三个试验，有其共同的特点。试验 T_1，它有两种可能结果，出现 Z 或出现 F；但在抛掷之前不能确定出现 Z 还是出现 F，这个试验可以在相同条件下重复进行。试验 T_2，它有 6 种可能结果，即出现的点数可能为 1, 2, …6 中之一；但在抛掷之前不能确定会出现几点，这个试验可以在相同的条件下重复进行。试验 T_3，结果同 T_1。归结起来它们有以下两个特点：

(1)可以在相同条件下重复进行。

(2)每次试验的结果不只一个，但事先不能知道是哪一个能出现。

在概率论中把具有上述特性的试验称为随机试验。

二、随机事件和样本空间

1.随机事件

在随机试验中，对一次试验可能出现也可能不出现的现象，而在大量重复试验中却有某种规律性的现象，称为此随机试验的随机事件，或事件。

在一次随机试验中，每一个可能出现的结果都是一个事件，它们是这个试验的最简单的随机事件，在这里称这些简单的事件为基本事件。

例如，在试验 T_1 中，出现 Z 和出现 F 就是基本事件。在试验 T_2 中，出现 1 点，出现 2 点，…，出现 6 点也是基本事件。

在一个基本事件中，除了基本事件之外，还有其他随机事件，例如，T_2 试验中出现偶数点也是一个随机事件，它是由出现 2 点、4 点和 6 点三个基本事件组成。

2.样本空间

一个随机试验中所有基本事件组成的集合叫这个试验的样本空间，记为 U。U 中的元素就是试验的基本事件，或样本点。本章第一节列举的三个试验的样本空间 U_s 可记为:

$U_1\{Z, F\}$

$U_2\{1,2,3,4,5,6\}$

U_3\{白色，红色\}

在上述第二个试验里出现偶数点的事件叫做样本空间的子集；即 A 是 U_2 的子集，记为 $A\{2, 4, 6\}$。又如在试验 U_2 中，出现小于 3 的事件也是一个子集，记做 $B=\{1,2\}$。必然发生的事件是样本空间 U;不可能发生的事件就是空集 Φ。

3.事件之间的关系与运算

设试验 T 的样本空间为 U; $A, B, A_s(s=1,2\cdots)$是 T 的事件。

(1)若事件 A 发生，事件 B 也必然发生，则称事件 B 包含事件 A，记做 $B\supset A$，或 $A\subset B$。

(2)若事件 B 包含事件 A，事件 A 也包含事件 B，即 $B\supset A$，$A\supset B$，则称事件 A 与事件 B 相等，记做 $A=B$。

(3)事件 A 与事件 B 至少有一个发生，这一事件称为事件 A 与事件 B 的和，记做 $A\cup B$。

(4)事件 A 与事件 B 同时发生，这一事件称为事件 A 与事件 B 的积，记做 $A\cap B$ 或 AB.

类似地可以定义 $A_s(s=1, 2, \cdots n)$的和:

$$\sum_{s=1}^{n} A_s = A_1 \cup A_2 \cup \cdots \cup A_n = \bigcup_{s=1}^{n} A_s$$

以及 $A_s(s=1,2,\cdots n)$的积:

$$A_1 \cap A_2 \cap \cdots \cap A_n = \bigcap_{s=1}^{n} A_s$$

(5)事件 A 发生而事件 B 不发生，这一事件称为事件 A 与事件 B 的差。记做 $A-B$。

(6)若事件 A 与事件 B 不能同时发生，亦即 $AB=\Phi$，则称事件 A 与事件 B 是互不相容的。

(7)若事件 A 与事件 B 中必然有一个发生，且只有一个发生，它们满足条件

$$A \cup B = u \qquad AB = \Phi$$

此时称事件 A 与事件 B 互逆，或称 A 是 B(或 B 是 A)的对立事件，记做为 $A=\overline{B}$(或 $B=\overline{A}$)。

(8)必然事件，即每一试验必然发生的事件，全部样本空间等价于必然事件。

(9)不可能事件，即每一试验中都不可能发生的事件，空集等价于不可能事件。

三、事件的频率与概率

1.事件的频率

如果我们抛掷一枚硬币，为了描述 Z(正面)出现的可能性大小，将硬币抛 N 次，观察 Z 出现的次数为 n_z 次，则 $f_z(A)=\dfrac{n_z}{N}$ 就叫做在 N 次试验中 Z 出现的频率。根据前人的试验，如果抛掷的次数 N 愈大，则 $f_z(A)$就愈趋近于 0.5。

2.事件的概率

根据前人的试验，如果对随机试验 T 的样本空间 U 进行试验，试验的次数 N 愈大，则事件 A 出现的频率 $f(A)$逐渐稳定于某一常数 $P(A)$；当 N 很大时则 $f(A)=P(A)$。数值 $P(A)$是客观存在的，即对于每一个随机事件 A 总有一数值 $P(A)$对应。$P(A)$称为

事件 A 的概率。概率具有下列性质:

(1)对样本空间 U 中的每一事件 A 有 $0 < P(A) < 1$。

(2)$P(U)=1$

(3)对两两互不相容的事件 $A_i (i=1,2,\cdots)$, 则

$$P(\sum_{i}^{n} A_i) = \sum_{i}^{n} P(A_i) \tag{2.1}$$

根据上述性质可推出下列基本公式:

(1)设$\overline{A}$是 A 的对立事件, 则

$$P(A) = 1 - P(\overline{A}) \tag{2.2}$$

(2)若 Φ 是不可能发生事件, 则

$$P(\Phi) = 0$$

(3)设 A、B 为两事件, 则

$$P(A \bigcup B) = P(A) + P(B) - P(AB) \tag{2.3}$$

(4)由式(2.3)可以推出

$$P(A_1 \bigcup A_2 \bigcup \cdots \bigcup A_n) = \sum_{i=1}^{n} P(A_i) - \sum_{i<j=2}^{n} P(A_i A_j) + \sum_{i<j<k=3}^{n} P(A_i A_j A_k) + \cdots + (-1)^{n-1} P(A_1 A_2 \cdots A_n) \tag{2.4}$$

3.条件概率和全概率公式

(1)条件概率:

设 A, B 为随机试验 T 的两个事件, 且 $P(A) > 0$, 则

$$P(B|A) = \frac{P(AB)}{P(A)} \tag{2.5}$$

为事件 A 发生的条件下事件 B 发生的条件概率。

(2)概率的乘法定理:

设 $P(A) > 0$, 则有

$$P(AB) = P(B|A)P(A) \tag{2.6}$$

(3)全概率公式:

设事件 B 能够且只能与互不相容的事件 $A_1, A_2, \cdots A_n$ 之一同时发生，利用概率的完全可加性和乘法定理可得全概率公式

$$P(B)=\sum_{i=1}^{n}P(A)P(B|A_i) \tag{2.7}$$

(4)巴叶斯(Bayes)公式:

利用条件概率和全概率公式可导出巴叶斯公式

$$P(A_i|B)=\frac{P(A_i)P(B|A_i)}{\sum_{j=1}^{n}P(A_j)P(B|A_j)} \tag{2.8}$$

式中 事件B能够且只能与互不相容的事件$A_1, A_2, \cdots$之一同时发生。即

$$B=\sum_{i=1}^{n}BA_i$$

4.事件的独立性

设在一组固定条件下重复做一种试验，每次试验所出现的结果的全体为 $A_1, A_2, \cdots A_k$，并且它们互不相容。它们的概率分别为 $P(A_1),P(A_2)\cdots, P(A_k)$; 若在重复的 n 次试验中，每次结果的概率都不依赖其他各次的结果，则这 n 次试验称为独立的。因此，若令第一次试验的结果为 A_{j1}，第二次为 $A_{j2}, \cdots$，第 n 次为 A_{jn}; 则 n 次试验为独立的定义为

$$P(A_{j1},A_{j2}\cdots A_{jn})=P(A_{j1})P(A_{j2})\cdots P(A_{jn}) \tag{2.9}$$

第二节 随机变量及分布函数

本节研究在每次试验的结果可以用一个数 ξ 来表示的情况。这个变量 ξ 是随着试验的结果不同而变化的，在这里称它为随机变量。例如，n 次射击中的命中次数，一台纺织机在一分钟内的断

头次数，都是随机变量，而且全部可能取到 n 值是有限个或是可列无限多个，这种随机变量都是离散形的随机变量。

设 $x_i(i=1, 2, \cdots)$是离散型随机变量 ξ 的所有可能值，而 $P_i(i=1,2,\cdots)$是 ξ 取值 x_i 时的概率，即

$$P(\xi = x_i) = P_i(i = 1,2,\cdots) \qquad (\sum_{i=1} P_i = 1) \tag{2.10}$$

显然，此时样本空间 U 可以看作是

$$(x_1,x_2,\cdots)$$

我们称式(2.10)为离散型随机变量的概率分布。

在实际生活中，并不是所有的试验都能用离散型的随机变量来描述的。例如测量某圆柱体的直径时所产生偶然误差 ξ 的取值，显然是充满一个区间的。称它为连续型的随机变量。这时候，测量误差要用落在某一范围的概率来描述，如

$$P(a \leqslant \xi < b) = P(\xi < b) - P(\xi \leqslant a) \tag{2.11}$$

所以我们只需知道 $P(\xi<b)$和 $P(\xi\leqslant a)$就可以了。由此可以看出，连续型的随机变量与离散型的有很大的区别。为了进一步研究随机变量的性质，必须给它一个统一的定义。如果每次试验的结果，可以用一个数 ξ 来表示，而且对任何实数 x, $\xi<x$ 有着确定的概率，则 ξ 被称为随机变量。所以事件$(\xi<x)$的概率一定是一个 x 的函数，令

$$F(x) = P(\xi < x) \tag{2.12}$$

式(2.12)称为 ξ 的分布函数。

对任意实数 x_1, $x_2(x_1<x_2)$, 有

$$\begin{aligned} P(x_1 < \xi \leqslant x_2) &= P(\xi \leqslant x_2) - P(\xi < x_1) \\ &= F(x_2) - F(x_1) \end{aligned} \tag{2.13}$$

因此，若已知 ξ 的分布函数就可以知道 ξ 落在任一区间(x_1, x_2)上的概率。从这个意义上来说，分布函数完整地描述了随机变量的

统计规律。如果 ξ 是数轴上随机点的坐标，分布函数 $F(x)$在 x 处的函数值就表示点 ξ 落在区间$(-\infty,x)$上的概率。

分布函数 $F(x)$具有以下基本性质。

(1)$F(x)$是一个不减函数。

因为 $F(x_2)-F(x_1)=P(x_1<\xi<x_2)>0,(x_2>x_1)$。

(2)$0<F(x)<1$ 且

$$F(-\infty)=\lim_{x\to-\infty}F(x)=0$$

$F(+\infty)=\lim\limits_{x\to+\infty}F(x)=1$。概率分布函数的导数称概率密度分布函数：

$$f(x)=\frac{\mathrm{d}F(x)}{\mathrm{d}x}$$

概率分布函数与概率密度分布函数之间存在如下关系：

$$F(x)=P(\xi<x)=\int_{-\infty}^{x}f(x)\mathrm{d}x$$

$$P(x_1<\xi\leqslant x_2)=F(x_2)-F(x_1)=\int_{x_1}^{x_2}f(x)\mathrm{d}x$$

$$F(+\infty)=\int_{-\infty}^{\infty}f(x)\mathrm{d}x=1$$

此式表明概率密度分布函数曲线下的面积等于 1。由上述关系可以看连续随机变量取某一确定值的概率等于 0。

图 2.1 是离散型随机变量的概率密度分布及概率分布图；图 2.2 是连续型随机变量的概率密分布及概率分布图。