
建筑结构抗震设计讲座

(上册)

中国建筑科学研究院工程抗震研究所 编印

1988 · 3

建筑结构抗震设计讲座

中国建筑科学研究院工程抗震研究所 编印

前 言

继建设部科技干部培训中心举办的“建筑结构抗震设计讲座”之后，我们陆续收到了各方的来信，对讲座内容给予高度评价。应广大工程技术人员的要求，我们将讲课教材作了修改和补充，其主要内容有：

上 册

- (1) 地震危险性分析的原理和方法；周锡元
- (2) 基本烈度在抗震设计中的应用；高小旺
- (3) 地震反应谱及其在抗震设计规范中的应用；王广军

下 册

- (4) 多层钢筋混凝土框架抗震设计 钟益村
- (5) 砖石结构抗震鉴定与加固；钮泽葵

- (6) 高层建筑抗震设计若干问题；韦承基
- (7) 时程分析法在抗震设计中的应用；戴国莹
- (8) 不对称结构的抗震计算；魏 琏

此讲座可供从工程抗震专业的设计和施工人员，科研和高校土建专业师生及管理部的使用。由于时间关系，有待完善，不妥之处请多提意见。

地震危险性分析的原理和方法

周锡元等

一、绪论

地震是对人类威胁最大的自然灾害之一。由于目前人们对地震能量的积累，释放和传播的物理过程还缺乏深刻的了解，更不能制止和控制地震的发生，短期和中长期预报都没有很好的解决。在这种情况下提高建筑物，工业设备，市政工程以至整个城市和社会综合体的抗震能力已成为防御和减轻地震灾害的重要手段。抗震防灾工作需要有一定的设防标准，标准太高会导致过高的投资，标准太低则可能造成不应有的损失。在地震长期预报问题没有很好解决之前，抗震工作不大可能做得恰到好处。我们所面临的现实问题是如何在对周围地震环境不十分了解的前提下确定最适当的抗震设防标准，以发挥最大的投资效果。这里面又可分为二个問題，首先是如何在不确定的地震作用下选择最佳的设防标准。前者可用地震危险性分析方法来处理，后者实际是一种决策过程，可采用决策分析方法来解决。这次讲座主要讨论地震危险性分析的原理和方法。为了使土建专业的技术人员很快熟悉和掌握地震危险性分析方法，本讲座尽量用深入浅出的方式将现有的方法进行比较系统的介绍，进一步的应用和研究留待读者去发展和探索。

地震危险性分析的基本思想是把地震和地震作用当作随机现象，用概率统计方法进行分析和研究，给出不同发生概率的地震动参数。这种做法对土建技术人员其实并不生疏。例如在水利工程中早就用不同重现期的水位作为设计标准，某地区的最大风速通常也总是与一定的重现期相联系的。在结构设计中荷载效应与抗力也可当作随机变量来处理。在这些问题中泊松过程和极值统计理论已获得了广泛的应用。地震的发生及其影响的随机性并不亚于洪水和风，与作用在建筑结构上的静荷载和活荷载相比地震荷载的不确定性就更大了。但是用概率方法来分析地震作用却要比其他问题晚一些，处理方法也不大一样。事实上在处理洪水位和风速问题时往往只对当地历年来积累的观测数据作为随机变量进行数理统计，并在此基础上进行概率预测。在进行这种分析时往往不涉及到源的发生和运动模式，而在地震问题中既要考虑震源的随机特性，也要考虑地震作用在传播过程中的随机性，也就是说既要用地震本身的数据，也要应用地震所造成的破坏影响的数据，因此问题更要复杂一些，计算工作量也比较大。另一个困难是由于地震发生的重现周期长，历史记载相对来讲是比较短的。我们是世界上地震记载历史最长的国家，但相对于大地震发生的重现期来讲也是很短的。至于强地震的仪器观测数据就更少了。这些困难使概率统计分析方法长期以来没有得到应有的重视。但是随着计算技术的发展和观测数据的积累，近十几年来地震危险性分析方法已开始在抗震防灾工作中发挥愈来愈大的作用。

一般认为概率方法对地震破坏作用进行地震危险性分析是美国麻省理工学院 Cornell 在 1986 年开始的⁽¹⁾，近二十年来取得了很大的进展，许多实用计算方法和通用的计算机程序已经建立起来了，虽然在实际应用中还存在许多问题，但是地震危险性分析方法作为一种手段已经在重要工程的抗震设计和抗震规范中得到了广泛的应用，在许多国家中甚至已成为工程设计和制定抗震防灾规划中必不可少的例行程序。

地震危险性分析的目的在于计算给定场地在将来不同时间段内可能遭遇的地震动参数（包括烈度，峰值加速度和反应谱等）的概率分布（见图 1.1 中的例子）。一般来讲结构和其它工程设施的时间愈长允许的超越概率越小，可能遭受的地震强度就越大。总之，用地震危险性分析方法得到的烈度，加速度值并不是固定不变的，而是在一定范围内变化的量，使用时选用什么样的值作为设防标准简单来讲决定

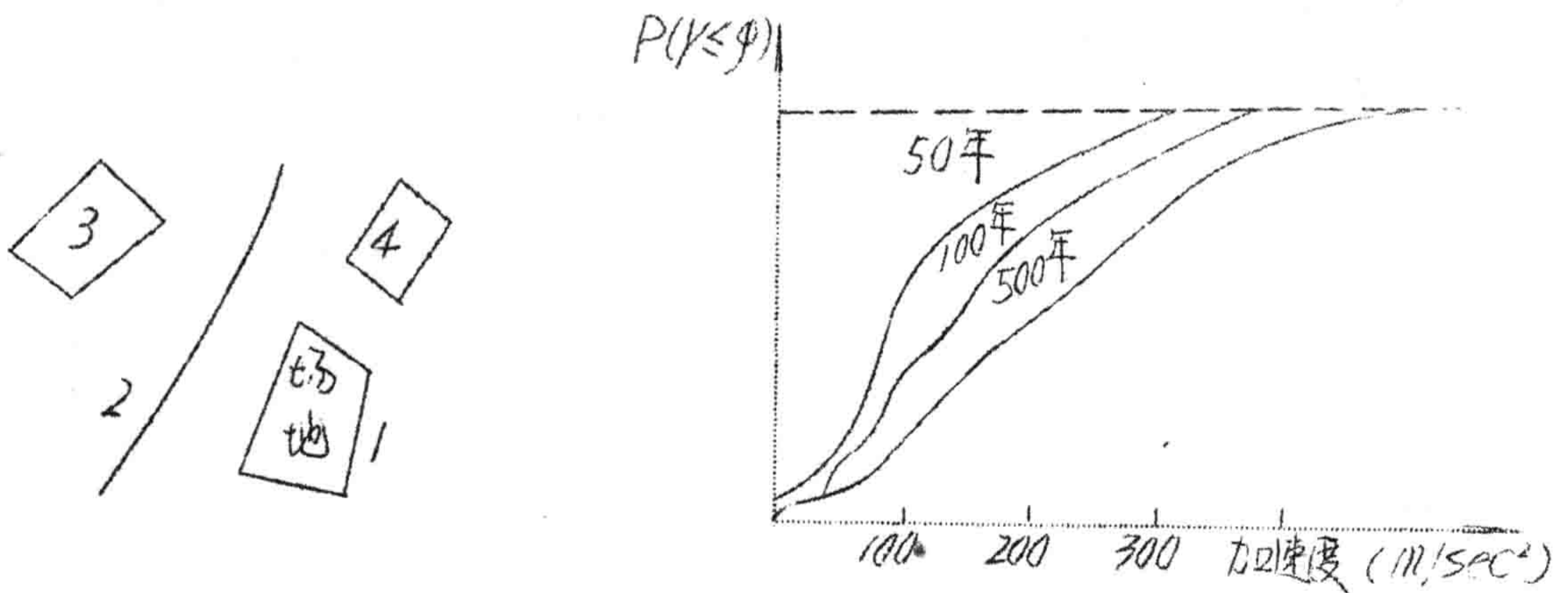


图 1.1

于使用寿命和允许冒的风险概率。更细致的方法是对各种可能的地震作用（如烈度，加速度等）进行分析，研究当应用这些不同的可能值进行设防时可能增加的投资和可能减少的损失，通过得益和损失的综合平衡来决定适当的设防标准，这就是前面所说的决策分析方法。

为了便于理解和掌握基本原理的实用方法，在下一节中我们准备先对地震危险性分析方法作一个概括的介绍，使读者先建立一个完整的概念，然后再比较深入地介绍各种实用方法和有关的问题，其中包括潜在震源的划分和震源模型的选择。地震活动性和震级分布，计算在某一震源中发生地震的条件下给定场地上地震动参数概率分布的各种方法。

为了便于理解和先建立直观的概念，在这次讲座中我们只介绍以泊松过程为基础的地震危险性分析方法，着重于介绍基本概念和实用的计算方法，有关数字计算技巧和计算程序方面的问题不准备作过细的讨论，有关的数字推导列在附录中。总之，我们希望这次讲座能够成为入门的向导，读者学完以后不妨用手算方法独立计算一、二个实例，以巩固所学内容，并为今后进一步发展和运用这一新方法奠定基础。

二、地震危险性分析方法简介

为了使读者对工程场地的地震危险性分析有一个概括的了解，在这一节中我们先用直感方法介绍地震危险性分析的基本步骤和方法⁽²⁾

此法的优点是只要通过简单的作图和计算便可估计工程场地所面临的地震危险性。缺点是有许多因素（如衰减规律的不确定性等）未能考虑。另外，此法的概念和计算方法虽然很简单，但实际使用起来还是很费事的。下面就来介绍此法的基本步骤和方法。

1. 应用此法前首先要将场地周围的潜在震源划分出来，假设各震源都位于同一水平面内。图2.1所示为场地和震源的相对位置。对图2.1所示的情况，场地位于第1个震源的内部，这个震源称为内源，

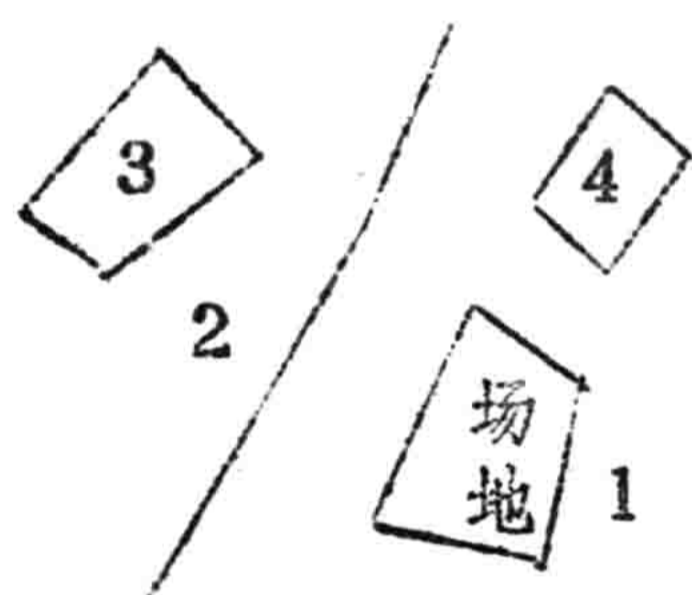


图2.1

其余震源则称为外源。图上所列除第2震源为线源外，其余均为面源，其平面形状可以是任意的。一般来讲线源总是与一定方向的发震断裂相对应的，有时也可用狭长的面源来代替。

震源的划分应根据本地区的地震地质，历史地震记载和其它有关资料经过分

析研究以后再确定；对于重要的场地，还应会同地震部门的专家共同研究。由于大地震的波及范围（指可损坏建筑物的范围）一般在150—300公里的距离以内，因此300公里以外的震源一般可不予考虑。

2. 确定每个震源的面积和单位面积或单位长度上的地震年发生率。假设各震源中的地震发生都服从简单泊松过程，这是一种无记忆的平稳过程，只需要用一个参数便能代表，那就是地震的年平均次数或年发生率 λ 。各震源的地震年发生率可以从历史地震资料的统计分

析中求得，必要时也可以根据地震地质专家有关构造地震的观测数据和经验来确定。设第 k 个震源的年平均发生率为 λ_k 由于发生在各震源中的各次地震的大小并不相等，因此我们需要进一步划分震级范围。设 m_0 是对工程有影响的最小震级，一般可取 $m_0 = 4.0$ ， m_u 是本地区或某震源中可能发生的最大地震。为了区别大小不同的地震，我们可以在 m_0 到 m_u 之间划分为若干等分，震级划分的步距为 Δm_0 ，

$\Delta m = \frac{1}{4} \sim \frac{1}{2}$ 。为了方便计算，我们把所有各震源中的地震都按同样的步距 Δm 进行分挡。每个挡次中地震的震级都近似用这一挡中的平均震级来代替，例如第 j 个挡次的震级都近似用这一挡中的平均震级来代替，例如第 j 个挡次的震级 $m_j = m_0 + (j - \frac{1}{2}) \Delta m$ 。各个震源的最大和最小震级可以不同，但各个震源的震级挡次的划分都应该相同，例如当 $m_0 = 4$ ， $m_u = 6$ ， $\Delta m = 0.5$ 时震级分挡数

$N = \frac{6-4}{0.5} = 8$ 各震级挡次的代表值为 4.25，4.75，5.25，5.75，6.25，……7.75。显然每个震源中各挡次的地震都有相应的年发生率，记为 λ_{jk} ，其中 j 表示震级挡次的序号， k 是震源的序号。为便于进行计算，各震源的震级可按同样方法划分挡次。

为了计算简单，我们进一步假设各挡次中地震也是相互独立的，即每个挡次中的地震的发生是相互独立的，每个震源都相当于 N 个震源重合在一起。如果震源总数为 L 个，每个震源都分成 N 个震级分挡，那么分震源总数就等于 $L \times N$ 个了。

假如第 k 个震源的面积为 A_k ，该震源中第 j 个震级分挡的地震

年平均发生率为 λ_{jk} ，那么该震源单位面积上发生在第 j 个震级分挡内的地震的年平均次数或年平均发生率 $Q_{jk} = \lambda_{jk} / A_k$ 。

3. 以场地为圆心把震中距以 ΔR 为步距划分为 N 个挡次。若设 R_0 为从场地到最近震源的最短距离，当场地位于某个震源内时（如图 2.1 中所示的情况） $R_0 = 0$ 。 R_u 为从场地到各震源的最远距离，则 $M = \frac{R_u - R_0}{\Delta R}$ 。 ΔR 一般可取 2—5 公里。在第 i 个挡次内距离的代表值 $R_i = R_0 + (i - \frac{1}{2}) \Delta R$ 。

4. 以场地为圆心，从 R_0 开始到 R_u 为止画一系列同心圆，各个圆的半径为 $R = R_0 + i \times \Delta R$ ($i = 0, 1, 2, \dots, N$)。用图解方法计算每个震源落在每个圆环中的面积 ΔA_{ik} 。这里面积 ΔA_{ik} 表示第 k 个震源落在第 i 个圆环中的面积，发生在这个面积上的震级为 M_i 的地震年平均次数为

$$\lambda_{ijk} = Q_{jk} \cdot \Delta A_{ik} \quad (2.1)$$

当第 i 个圆环与第 k 个震源不相交时 $\Delta A_{ik} = 0$ 。

以上公式还用于平面震源，对于线形震源可按同样的道理进行计算：

$$\lambda_{ijk} = Q_{jk} \cdot \Delta L_{ik} \quad (2.2)$$

式中 $Q_{jk} = \lambda_{ik} / L_k$ ， L_k 是该线形震源的总长度， ΔL_{ik} 是落在第 i 个圆环中的长度。

通过以上计算，我们已把第 k 个震源中震级大于下限值 m 的地震年平均次数 λ_k 分配到不同震级分挡次 m_j 和相对于场地的距离分挡 R_i 的范围以内，显然有

$$\lambda_k = \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^M \lambda_{ijk}$$

$$\lambda = \sum_{k=1}^L \lambda_k$$

这里， λ 是各震源中震级大于下限值的地震发生率的总和。

对于每个震源，我们都可以按公式 (2.1) 计算出 λ_{ijk} ，形成 L 个矩阵。然后把这 L 个矩阵中的对应项相加在一起，便得所有震源按震中距 R 和震级 m 分挡的年平均发生率（次数）

$$\mu_{ij} = \sum_{k=1}^L \lambda_{ijk} \quad (2.3)$$

这也是一个矩阵，不难看出，下列关系式应该成立：即

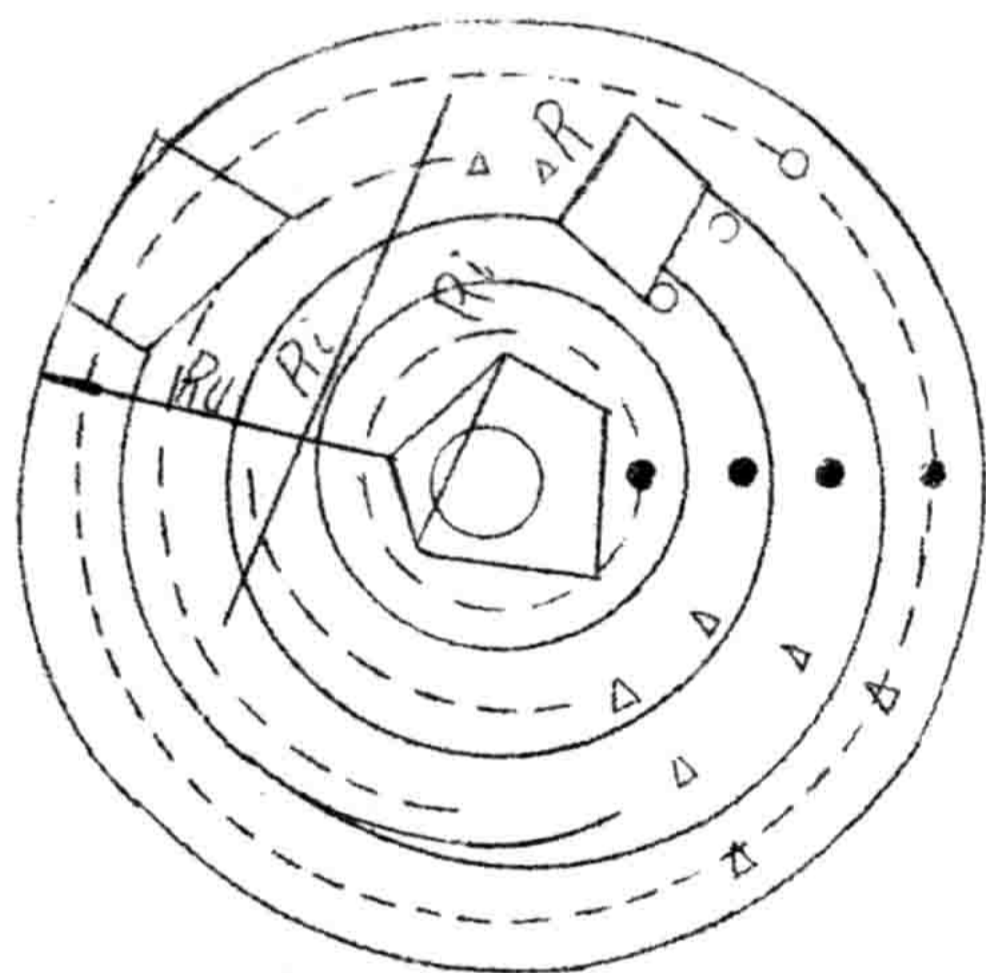
$$\lambda = \sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^N \mu_{ij} \quad (2.4)$$

上式中 N 是震级分挡的总数， M 是距离分挡的总数。

以上简化方法实质上是把场地周围的震源简化为位于以场地为中心的圆周上的一系列点震源（见图 2.2），同一圆周上的每个点都代表该圆环中某一个震级分挡的震源。图 2.2 中虚线所示圆周的半径 R_i 表示这个距离分挡的代表值。由于场地上的地震动强度（或烈度）只

决定于震级大小和距离，因此若将图 2.2 中同一个圆周上的各震源合在同一个点上，对场地的影响是相同的。因此，如果给定距离上的地震共有 N 个震级分挡，可以看作是 N 个点震原重合在一起。

5. 以上我们解决了地震年平均发生率按照震级和震中距分配的问题，结果被表示为矩阵 μ_{ij} 的形式。有了上述结果我们就不难利用地震动衰减公式来确定所考虑场地上地震动强度（加速度、烈度等）超过给定值的年发生概率。



在比例中 $R_0 = 0$ 符号， \circ Δ \square 表示不同的震级。

图 2.2

所谓衰减规律是地震动强度随震级和震中距离变化的公式或曲线，其通用形式可表示为：

$$y = Y(m, R) \quad (2.5)$$

具体的表达式将在后面进一步介绍。应该指出，衰减规律实际是联系震源区的地震活动和场地上地震动之间的桥梁。衰减规律可以对各种地震动参数，包括峰值加速度，速度和均方根加速度及至反应谱、富氏谱等等。对不同的物理量进行地震危险性分析的方法都是相同的，所不同的只是所用衰减规律的含义和内容不同。此外场地条件的影响也可以在衰减规律中加以考虑。不管各种衰减函数的形式如何。共同的特点是地震动强度随地震增大而增大，随着距离增大而减小，这里所谓的衰减就是指随距离的变化。由于地震时考虑工程场地上的地震动强度决定于震级 m 和震中距离，而 m 和 R 已分别划分为若干档次，每个档次中的值都用这个档次中的平均值来代替，即 m_j ($j = 1, 2, \dots, N$) 和 R_i ($i = 1, 2, \dots, M$)，这样当给定 M_j 和 R_i 时便可从衰减公式 (2.5) 中算出一个相应的烈度或峰值加速度，记为 y_{ij} ($i = 1, 2, \dots, M, j = 1, 2, \dots, N$)，它也是一个矩阵，这个矩阵反映了地震动强度随震级和震中距的变化，实际是衰减规律的高散化表达方式，因此也可以不通过公式进行计算，而直接按强震记录中进行统计。

6. 经过以上步骤以后我们得到了两个矩阵，即 μ_{ij} 与 y_{ij} 。有了这两个矩阵我们就可以计算所考虑场地上地震动强度超过某给定值 y 的年平均次数，记为 $\lambda (Y > y)$ ，方法十分简单，只需要把 y_{ij} 矩阵中数值上大于给定值 y 的项圈出来，然后把这些项对应的地震年平均发生次数加在一起，即

$$\lambda (Y > y) = \sum_{y_{ij} > y} \mu_{ij} \quad (2.6)$$

为什么可以这样做，道理是很简单的。事实上，如果地震发生 $M-R$ 网格中的第 i, j 个点 (M_j, R_i) 将使所考虑场地产生 $Y > y$ 的地震影响，那么在这个点上的地震发生率 μ_{ij} 也就是所考虑场地震动强度 $Y > y$ 的年发生率，总的年发生率当然就是 $M \sim R$ 网格中所有能使 $Y > y$ 的年发生率 μ_{ij} 的总和。由于地震动强度一般都随震级单调上升，距离单调下降，因此如果把 y_{ij} 矩阵排列在图 2.2 中，不难发现 $y > y_{ij}$ 的点一般都在这个阵列的右上方， y 值愈大点愈少。式 (2.6) 中的 μ_{ij} 就是与 $y_{ij} >$ 相对应的年发生率。

7. 由于我们假设地震的发生服从泊松过程，而场地上的地震动是周围的地震所造成的影响，因此场地上地震动强度超过给定值这一事件作为一种随机过程也可以看作是一种泊松过程，其发生率 $\lambda (Y > y)$ 既已求得，那么按照附录一中的公式 (A1.6) 不难计算在 t 年内地震动强度 $Y > y$ 这一事件发生一次以上的概率为：

$$P_t (Y > y) = 1 - e^{-\lambda (Y > y) \cdot t} \quad (2.7)$$

场地上 t 年内地震动强度的概率分布为：

$$P_t (Y \leq y) = e^{-\lambda (Y > y) \cdot t} \quad (2.8)$$

对于不同的 y 值和不同的时间 t ，将上式中的 $P_t (Y \leq y)$ 画成

曲线一般具有图 1.1 中所示的形状。

三、地震活动性参数的确定

在以上讨论中我们假设每个震源中各震级分挡内的地震年平均发生次数已知，记为 λ_{jk} 这些参数当然可以直接根据历史地震记载统计得到，当缺乏完整的历史地震资料时也可以根据地震专家的经验进行估计，后一种方法虽然具有一定的主观成分，但却可以考虑来自地质和地球物理方面的资料，在以上分析中我们是把大小地震的发生当作是没有联系的现象。但是实际地震记录表明大小地震是按照一定比例关系发生的。不同震级水平的地震的在时间和空间上的发生规律通常称为地震活动性。在地震危险性分析中研究地震活动性的主要目的是为了确定震级大于给定阈限的地震的年平均发生次数和不同震级地震的比例关系。在本节中我们将要看到，这些参数不难从著名的 Richter 震级频度关系中推导出来。有了这些参数我们就可以比较适当的来估计每个震源在每个震级分挡中的地震年平均发生次数 λ_{jk} 了。具体的算法将在这一节末尾加以介绍。

应该指出地震活动性参数的确定总是与一定的地震复发模型相联系的，为简单起见我们只限于讨论以泊松模型为基础的地震危险性分析方法。有关泊松模型的基本公式推导参见附录 1。需要指出的是在泊松模型中每个震级大于某个阈限的地震都算作是一个事件，不管他们的

y_{ij} - 烈度随震级距离的变化

$R \backslash m$	m_1	m_2	m_3	•	•	•	•	m_N
R_1	y_{11}	y_{12}	y_{13}	•	•	•	•	y_{1N}
R_2	y_{21}	y_{22}	y_{23}	•	•	•	•	y_{2N}
R_3	y_{31}	y_{32}	y_{33}	•	•	•	•	•
•	•	•	•	•	•	•	•	•
•	•	•	•	•	•	•	•	•
•	•	•	•	•	•	•	•	•
•	•	•	•	•	•	•	•	•
R_m	y_{m1}	y_{m2}	y_{m3}	•	•	•	•	y_{mN}

$y_{ij} > y$

注: y_{ij} 按公式 (2.5) 计算

M_{ij} — 地震年发生率随震级距离的变化

$R \backslash m$	m_1	m_2	m_3	•	•	•	•	m_N
R_1	μ_{11}	μ_{12}	μ_{13}	•	•	•	•	μ_{1N}
R_2	μ_{21}	μ_{22}	μ_{23}	•	•	•	•	μ_{2N}
R_3	μ_{31}	μ_{32}	μ_{33}	•	•	•	•	μ_{3N}
•	•	•	•	•	•	•	•	•
•	•	•	•	•	•	•	•	•
•	•	•	•	•	•	•	•	•
•	•	•	•	•	•	•	•	•
RM	μM^1	μM^2	μM^3	•	•	•	•	μMN

注: $\lambda(Y > y) = \sum_{y_{ij} > y} \mu_{ij}$

图 2.3