

时间相依的地震危险性概率分析

杨 明¹, 刘百箴²

(1. 重庆建筑大学建工学院, 重庆 400045;

2. 中国地震局兰州地震研究所, 甘肃 兰州 730000)

摘要: 阐述了基于泊松模型以及时间相依的特征地震模型的地震危险性概率分析的基本原理与方法. 以祁连山中东段为例, 对2种不同模型的地震危险性概率分析结果做了对比研究, 指出时间相依的地震危险性概率分析在理论上可能更为合理, 并且可以应用于强震的短临预测研究.

关键词: 地震危险性评估; 概率评估; 泊松模型; 特征地震模型

中图分类号: P315.9 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-0844(2000)01-0010-06

0 引言

地震危险性概率分析 (Probabilistic Seismic Hazard Analysis) 在地震工程学中占有重要的地位. 它忽略了震源破裂、弹性波传播过程中的细节, 给出了地震危险性分布的宏观图像及便于工程应用的设计地震动参数. 地震危险性概率分析的最新的进展为关于输入参量不确定性及输出结果随机性的处理^[1]. 与此同时, 随着对活断层定量研究的深入, 地质、遥感测量、测震学资料在地震危险性概率分析中显得越来越重要^[2~4]. 这些参量的应用在很大程度上减小了地震危险性概率分析中的不确定性. 特征地震模型作为一种新的强震发生模型被引入地震危险性概率分析中, 使得分析方法和预测结果都有了很大的改善. 本文阐述了特征地震模型的基本原理及分析方法, 并与泊松模型进行了对比.

1 基于泊松模型的地震危险性概率分析

泊松模型是目前工程中应用最广泛的复发模型. 基于泊松模型的地震危险性概率分析方法在文献[5]中进行了介绍. 泊松模型满足以下条件^[6]:

(1) $N(t, t+t_0)$ 与 t 之前任何时刻 τ 的 $N(\tau, \tau+t_0)$ 无关.

(2) $P[(N_{t+t_0}(M) - N_t(M)) \geq 2] = 0(t_0)$.

(3) $E[N_{t+t_0} - N_t] = \nu t_0$.

其中: t_0 为预测时段, M 为震级, $N(M)$ 为发震次数, ν 为地震的年平均发生率.

若某地区地震活动性能很好地用泊松过程描述, 则2次震级 $\geq M$ 的事件间隔独立且符合指数分布, 即

$$f(t) = \nu \exp(-\nu t) \quad (1)$$

则在预测时段 T 内下次事件发生的概率为

$$P(t \leq T) = 1 - \exp(-\nu T) \quad (2)$$

以上式为基础, 通过概率推导并与震级-频度关系及衰减关系相结合, 可得到地震危险性概率。

上述条件表明, 泊松模型是无时间记忆的, 且在时间轴上是等概率的。显然这与断裂本身的破裂习性和地震复发的实际情况是相矛盾的。

2 基于特征地震的地震危险性概率分析

考虑到震源机制时, 泊松模型的不合理性是显然的。活断层研究表明, 强震发生多服从特征地震复发行为, 其震级-频度关系服从特征地震的震级-频度关系模式。根据不同研究者的资料, 特征地震具有如下特征^[7,8]:

(1) 特征地震的震级范围一般取一个特定断裂上或震源区主要地震的震级范围, 其可变区间大约为 0.5 个震级单位。

(2) 特征地震在原地复发, 具有相同的震源机制。

(3) 特征地震的发生并不排斥在相同断裂上发生震级比其小的地震, 但二者的震级-频度关系不同。

(4) 在同一断裂带上, 特征地震分级次, 可定义为单元特征地震及多重特征地震, 相邻单元段间存在相互作用。

由上述事实可见, 特征地震行为是一种更为复杂的地震复发行为, 与仅通过单一参量来描述的泊松模型相比, 特征地震模型则需要更多的参量来描述, 如断层几何学、古地震、历史地震及测震学资料等。

2.1 特征地震复发时间通用分布模型

不同研究者在研究特征地震复发时间的资料之后, 认为特征地震复发时间间隔服从对数正态分布^[7,9]。其概率密度函数

$$f(T) = \frac{1}{\sigma_D \sqrt{2\pi} T} \exp \left\{ -\frac{[\ln(T/T) - \mu_D]^2}{2\sigma_D^2} \right\} \quad (3)$$

其中: T 为复发间隔, σ_D^2 表征模型内在的不确定性, μ_D 为统计资料 $\ln(t/T)$ 归一化后之中位数, σ_D^2 和 μ_D 为模型参数。若考虑 T 的不确定性, 则预测分布密度

$$f(T) = \frac{1}{\sigma_M \sqrt{2\pi} T} \exp \left\{ -\frac{[\ln(T/T) - \mu_D]^2}{2\sigma_M^2} \right\} \quad (4)$$

$$\sigma_M = \sqrt{\sigma_D^2 + \sigma_P^2} \quad (5)$$

其中: σ_P^2 表征 T 的不确定性。

2.2 发震概率 P

基于地震原地复发的理论模式, 地震潜势可用条件概率来表征。设事件 $A(T \leq T_e + \Delta T)$ 表示下次地震在 $(0 \sim T_e + \Delta T)$ 区间发生, 事件 $B(T > T_e)$ 表示地震在区间 $(0 \sim T_e)$ 内没有发生, 则未来时段 $(T_e \sim T_e + \Delta T)$ 内发震的概率为

$$P = P(A/B) = \frac{P(A \cap B)}{P(B)} = \frac{\int_0^{T_e + \Delta T} f(t) dt - \int_0^{T_e} f(t) dt}{1 - \int_0^{T_e} f(t) dt} \quad (6)$$

其中： $f(t)$ 为特征地震复发时间间隔概率密度函数。

由上式可知，该模型不同于泊松模型，具有时间记忆性，因而是时间相依的预测模型。

2.3 基于特征地震模型的地震危险性概率分析

2.3.1 泊松模型与特征地震模型的耦合

对于泊松模型，在预测时段 T 内，下次事件发生的概率

$$P(t \leq T) = 1 - \exp(-\nu T)$$

而对于特征地震模型，其可比地震年发生率^[4]

$$\nu = -(1/T) \cdot \ln(1 - P)$$

其中： P 为预测时段内的特征地震发生的条件概率。

2.3.2 上限震级 M_{μ}

M_{μ} 主要由断裂长度所决定，其根本原因是断裂二端稳定障碍体的控制。基于时间相依的观点，可导出 M_{μ} 的 2 种含义，即实时 M_{μ} 和绝对 M_{μ} 。

2.3.2.1 实时 M_{μ}

实时 M_{μ} 取决于断裂段上滑动位移的积累以及次级稳定障碍体的控制。若断裂上长期平均滑动速率为常量，则其位移累积量^[10]

$$D = V \times (T_e + \Delta T)$$

则 M_{μ} 可由下式求得：

$$M_{\mu} = a + b \lg D$$

其中： a 和 b 为适用于研究区的经验系数。

2.3.2.2 绝对 M_{μ}

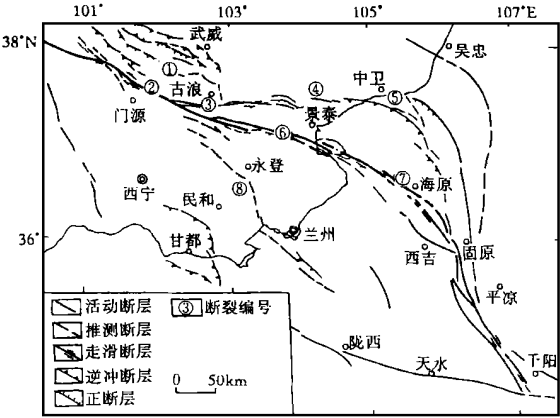
绝对 M_{μ} 由断裂带上最高级稳定障碍体控制，绝对 M_{μ} 是实时 M_{μ} 的上限。绝对 M_{μ} 对应于 $P \rightarrow 0$ ， $V \rightarrow 0$ ，而实时 M_{μ} 对应于特征地震的复发条件概率 P 。

3 祁连山东段的地震危险性概率分析

经过“八五”和“九五”期间的深入工作^①，在该区积累了一整套相对完整的活断层、古地震、历史地震、断层几何和测震学等定量资料。以这些资料为基础，分别按泊松模型和特征地震模型做出了研究区(101°~106°E, 36°~38°N)地面运动峰值加速度(PGA)区划图(50年超越概率为10%)。

3.1 基于泊松模型的地震危险性概率分析

按目前常规方法，将研究区划分为18个潜在震源区，见图2。其中包括8.5级地震的潜在震源区1个，8.0级1个，7.5级6个，7.0级3个和6.5级7个，背景震级为6.0级。衰减关



① 冬青顶活断层 ② 冷龙岭活断层 ③ 古浪活断层；
④ 大靖活断层 ⑤ 中卫活断层 ⑥ 老虎山-毛毛山-
金强河活断层 ⑦ 海原活断层 ⑧ 庄浪河-马衔山活断层

图1 研究区及邻区活动断裂分布

Fig.1 Distribution of active faults in the studied area and its vicinity.

① 刘百箴, 等. 祁连山活动断裂1:5万地质填图和特征地震研究报告. 1996.

系^[10]示于图 3 中.

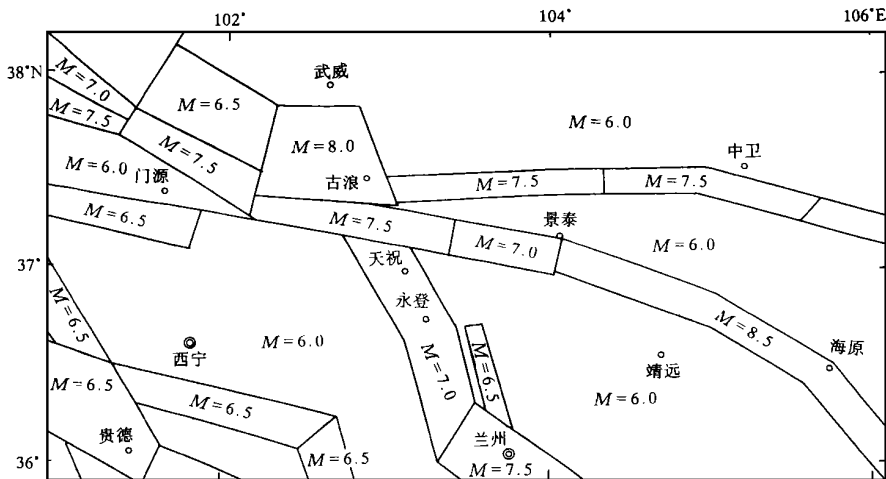


图 2 基于泊松模型的潜在震源划分

Fig. 2 Distribution of potential earthquake zones by the Poisson's model.

3.2 时间相依的地震危险性概率分析

按前述基本原理, 并考虑相邻断裂段间的相互作用, 对研究区重新划分潜在震源区, 见图 4. 共划分 18 个潜在震源区, 其中包括 7.5 级地震的潜在震源区 1 个, 7.0 级 6 个, 6.5 级 9 个和 6.0 级 2 个, 背景震级为 5.0 级. 衰减关系同上, 见图 5.

4 基于 2 类不同模型的地震危险性概率分析结果对比

通过对比, 发现 2 种模型的分析结果差别较大. 对于泊松模型而言, 其 PGA 分布图基本反映了构造线在空间的展布. 若改变预测时段, 可以得到不同时段的 PGA 分布图. 随预测时段的增长, 地震动参数 (a_{max}) 幅值同步增长, 其三维形态显得越来越高耸, 然而总的三维形态格架保持不变, 波谷始终是波谷, 波峰永远是波峰. 而对于特征地震模型, 其结果则表现为, 对于离逝时间 T_e 接近或超过地震平均复发间隔 T 的断裂区, 地震动参数幅值很大, 且随预测时段增长而越来越高耸; 对于 T 很长的断裂段及 T_e 远远小于 T 的断裂区, 幅值很低且随预测时段增长变化不明显. 若进一步外推, 假如某些高耸区在未来特定时段发震, 则该区应变能得到释放, 在以后的 PGA 图上, 波峰变平, 直至变为波谷, 而随着其他断裂区危险时段的迫近, 原来的波谷将变为波峰.

泊松模型不考虑离逝时间 T_e , 是无时间记忆的, 各震级档次中地震的年平均发生率 ν 不随预测时段而变化, 潜在震源区划分也不变, 震级上限 M_{μ} 是绝对的, 因此各未来时段的危险性是危险密度不变下的逐渐积累. 而时间相依的特征地震模型考虑离逝时间, 同时考虑活动断裂各自不同的活动性态, 故以上参量随时间而改变, 具有实时性. 总之, 泊松模型是粗糙的, 它将

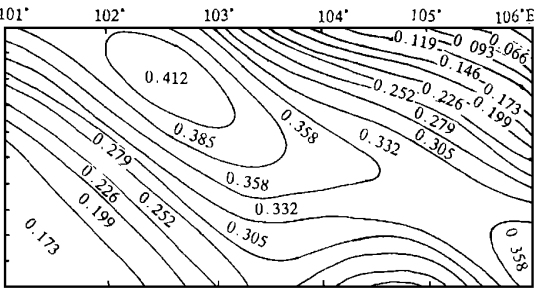


图 3 地面运动峰值加速度分布(泊松模型)

Fig. 3 Distribution of peak value of ground motion acceleration by the Poisson's model.

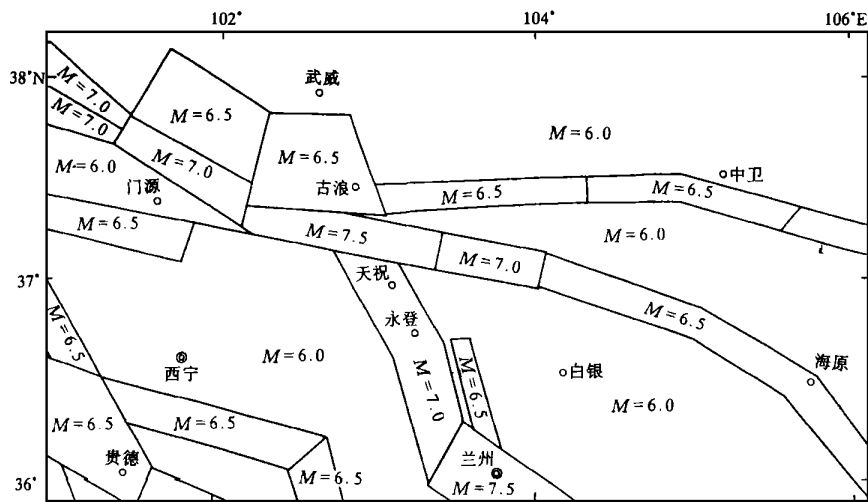


图4 基于特征地震模型的潜在震源划分

Fig. 4 Distribution of potential earthquake zones by the characteristic earthquake model.

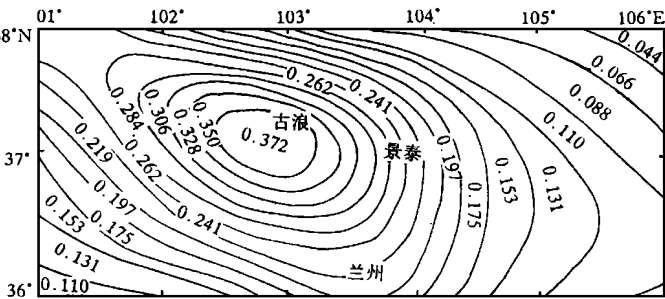
整个研究区域的地震危险性平均化了,而实时的特征地震模型则更为精细复杂,在突出重点危险区的同时不会夸大不危险地区,因而其结果更合理。

需要说明的是,我们的研究目的仅仅是为了服务于强震中短期预测而进行的实验性研究,没有更多地考虑其它因素,因此,目前尚不能在实际工程地震中应用。

5 结语

泊松模型作为工程中广泛使用的模型,具有参数单一、计算简便的特点.然而对于地震危险性主要由源区主干断裂上的强震控制,且强震复发显示出很强的特征地震行为时,时间相依的地震危险性概率分析结果则更为合理,尤其是对 $M \geq 7$ 的强震进行中短期预测时具有更重要的参考意义。

图5 地面运动峰值加速度分布(特征地震模型)
Fig. 5 The zoning map of peak value of ground motion acceleration by the characteristic earthquake model.



[参考文献]

[1] R K McGuire and J C Steep. Seismic hazard and its uncertainty in the eastern US [C] . Ann Conf Society for Risk Analysis, Boston, 1987.

[2] Working Group on California Earthquake Probabilities. Probabilities of large earthquake occurring in California on the San Andreas fault [C] . US Geol Surv Oper-file Rept, 1988. 88 ~ 89.

[3] Working Group on California Earthquake Probabilities. Probabilities of large earthquake in the San Francisco Bay region, California [C] . US Geol Surv Circ, 1990. 1053.

[4] Working group on California Earthquake Probabilities. Seismic hazard in southern California; Probable earthquakes, 1994 to 2024 [J] .

Bull Seis Soc Am, 1995, 85: 379~439.

- [5] Cornell C. A. Engineering seismic risk analysis[J] . Bull Seismic Soc Am, 1968, 81: 1583~1606.
- [6] 章在墉. 地震危险性分析及其应用[M] . 上海: 同济大学出版社, 1996.
- [7] 闻学泽. 活动断裂地震潜势的定量评估[M] . 北京: 地震出版社, 1995.
- [8] 刘百箴. 老虎山活动断裂构造及古地震研究[C] . 见: 中国活动断裂研究. 北京: 地震出版社, 1994.
- [9] 张培震, 毛凤英. 利用活动断裂定量研究资料确定地震活动性参数和评价地震危险性[C] . 见: 活动断裂的地震危险性评价方法专题研究. 1990.
- [10] Bernice Bender and David M Rerkins. SEIS RISK III: A computer program for seismic hazard estimation[J] . US Geological Surv Bull, 1987, 1772.

PROBABILISTIC SEISMIC HAZARD ANALYSIS DEPENDING ON TIME

YANG Ming¹, LIU Bai-chi²

(1. *Institute for Civil Engineering, Chongqing Architectural University, Chongqing 400045, China*; 2. *Lanzhou Institute of Seismology, CSB, Lanzhou 730000, China*)

Abstract: The fundamental principle and methods of probabilistic seismic hazard analysis based on the Poisson's model and the characteristic earthquake model depending on time are discussed. The comparison between two models and *PGA* maps of middle-eastern Qilian area are made. The results show that probabilistic seismic hazard analysis by characteristic earthquake model depending on time is more rational in theory than that by the Poisson's model.

Key words: Seismic risk evaluation; Probability estimation; Poisson's model; Characteristic earthquake model