

概率一致的期望地震和概率一致的保守地震^{*}

沈建文 蔡长青

(中国上海 200062 上海市地震局)

摘要 笔者分析指出, Kameda 等概率一致的假想地震、期望地震或设定地震的概念, 由于对概率法设防标准的理解不确切并非概率一致; 罗奇峰的相应概念符合概率一致, 但由于保留平均意义, 结果仍然不理想. 在分析指出上述问题的基础上, 笔者建议采用概率一致保守地震的概念, 提出了一种在概率法基础上选择有物理意义的抗震设防目标地震的新方法. 在对某控制物理量, 如峰值加速度作危险性分析, 并按某概率水平确定其设防标准后, 由有关衰减规律和潜源状况确定对应于该标准的地震或震级-距离组合. 此种震级-距离组合对应的地震对该物理量是概率一致的. 在此基础上, 我们建议兼顾其它物理量(本文考虑反应谱)的破坏作用, 选择保守地震取代平均地震, 以更好地满足设防标准的本意.

关键词 地震危险性分析 概率一致 假想地震 期望地震

引言

为了确定抗震设防标准, 进行抗震验算或震害预测, 需要确定场地的地震动参数乃至提供地震动时程. 确定场地地震动参数大体有以下 3 种做法: 一是确定性方法, 即据场地周围的地震构造和历史地震资料等, 确定可能的潜源, 再依照该地区的衰减关系, 确定场地的烈度或地震动参数. 我国 1978 年地震烈度区划图即是按确定性方法编制的. 确定性方法的明显缺点是: 预测震源及场地地震动参数的结论是绝对的, 与实际情况或人们的认识不符; 二为地震危险性分析的概率法. 概率法在综合考虑场地周围可能产生影响的潜在震源的基础上, 确定场地不同超越概率水平的地震动参数(Cornell, 1968). 概率法克服了确定性方法的不足, 得到了广泛的应用. 但概率法也有其自身固有的困难. 由于概率法综合考虑大小不同、远近各异的地震的影响, 其设防目标并不对应任何真实的地震. 针对目前广泛采用的用一致概率法得到基岩目标谱, 并据其合成基岩地震动作土层反应得地表设计地震动的做法, 我们已撰文讨论并提出“基于有物理意义地表地震动的一致概率法”(蔡长青, 沈建文, 1998). 该方法可以解决基岩目标谱不对应实际地震的问题, 但对地表经土层反应以后的地震动作概率计算后, 对应某一概率水平的仍是大量各种可能的实际地震; 三是部分接受概率法的结果, 确定某种与指定概率水平地震动参数对应的概率一致的假想地震或期望地震, 再据该有物理意义的地震进一步确定场地地震动的特征(Kameda, Nojima,

* 1997-10-05 收到初稿, 1998-10-07 收到修改稿并决定采用.

1988). 该法试图用概率法和确定性方法相结合的做法, 以弥补概率法的上述不足. 但由于两种方法之间的固有差异, 问题难以得到根本解决. 实际上不可能找到一个物理真实的地震, 完美地代表概率法的设防目标.

本文讨论概率一致假想地震存在的问题, 并在此基础上尝试提出概率一致的保守地震的概念, 以改进上述第 3 种做法, 尽管本文也不可能按第 3 种方法的思路, 根本解决概率法与确定性方法之间固有的矛盾.

1 概率一致的假想地震及其存在的问题

危险性分析概率法的优点是综合考虑场地周围所有潜在震源可能发生地震的影响, 用几组烈度和地震动参数(包括峰值加速度和反应谱等), 及其超越概率水平来评价场地的地震危险性. 其明显的不足是上述烈度或地震动参数未能与震级、震中距等物理概念联系起来, 因而, 当结构抗震动力分析需要地震动时程等进一步的要求时, 就找不到对应的有物理意义的震级、震中距等参数.

为了弥补概率法的上述不足, Kameda 等提出了概率一致的假想地震(Kameda, Nojima, 1988). 其震级 M 和震中距(或震源距) R 由下法确定: 若指定场地周围有几个潜在震源, 由危险性分析的统计法计算, 得该场点超越概率 P_0 的地震动强度为 $y(P_0)$, 则对场地地震动贡献较大的第 k 个潜源的统计一致假想地震的震级和震中距由下式给出:

$$M_k = \sum_i \sum_j m_i \cdot P_k[m_i, r_j | Y \geq y(P_0)] \quad (1)$$

$$\bar{R}_k = \sum_i \sum_j r_j \cdot P_k[m_i, r_j | Y \geq y(P_0)] \quad (2)$$

式中, $P_k[m_i, r_j | Y \geq y(P_0)]$ 是第 k 潜在震源在给定 $Y \geq y(P_0)$ 的条件下, 震级 m_i 和震中距 r_j 的联合概率分布.

高孟潭(1994)结合我国危险性分析的做法, 也给出了潜在震源区期望震级 \bar{M} 和期望距离 \bar{R} 的类似定义, 其计算方法为

$$\bar{R} = \sum_i^{Ns} \sum_j^{Nm} R_{kj} \cdot P_j(m_j, k | I \geq I_d) \quad (3)$$

$$\bar{M} = \sum_i^{Ns} \sum_j^{Nm} m_j \cdot P_j(m_j, k | I \geq I_d) \quad (4)$$

式中, $P_j(m_j, k | I \geq I_d)$ 为烈度 $I \geq I_d$ 的条件下, 震级和空间位置 k 的联合概率分布, R_{kj} 为场点与第 k 潜源单元的距离, Nm 是震级分档总数, Ns 为潜源离散后面元的总数.

上述震级和距离为场地地震动或烈度超过指定值条件下的平均值. 罗奇峰(1996)指出, 上述“危险性一致设定地震(或称作假设地震、期望地震), 并未与给定的地震危险水平保持一致”, 并给出了统计一致设定地震的如下定义:

$$\bar{M}_k(P_0) = \sum_i m_i \cdot P_k[m_i | Y = y(P_0)] \quad (5)$$

$$\bar{R}_k(P_0) = g_R[\bar{M}_k(P_0), y(P_0)] \quad (6)$$

或

$$\bar{R}_k(P_0) = \sum_i r_i \cdot P_k[r_i | Y = y(P_0)] \quad (7)$$

$$\bar{M}_k(P_0) = g_M[\bar{R}_k(P_0), y(P_0)] \quad (8)$$

对比上述定义，我们不难注意到，罗奇峰给出的定义（以下简称定义 B）中，条件为 $Y=y(P_0)$ ；而 Kameda 等和高孟潭的定义（以下简称定义 A）中，条件为 $Y\geq y(P_0)$ 。此外，罗奇峰只给出 $\bar{M}_k(P_0)$ 或 $\bar{R}_k(P_0)$ ，其配对的 $\bar{R}_k(P_0)$ 和 $\bar{M}_k(P_0)$ 由衰减公式算出。罗奇峰文中对应于式(6)中的 g 已改为 g_R ，式(8)中的 g 已改为 g_M 。 $R=g_R(M, y)$ 和 $M=g_M(R, y)$ 是同一衰减的不同形式。

定义 A 和 B 的不同似乎反映了不同研究者对抗震设防标准理解的差异。由于目前通常采用的概率水平有 3 个：50 年超越概率 63%、10% 和 3%，其对应的地震动或烈度通常分别称为小震、中震和大震（下文中小震、中震、大震均按此理解）。因而，实际上造成了 4 个概率或地震动区间（表 1）。对目前通常所说的“小震不坏、中震可修、大震不倒”可能存在 3 种不同的理解：理解 A 可能认为中震以下（当然包括小震以下）为不坏，中震到大震之间为可修，而大震以上为不倒；理解 B 可能认为小震以下为不坏，小震到中震之间为可修，中震到大震之间为不倒，而大震以上则可能倒塌；理解 C 可能认为小震、中震、大震可能为不坏、可修、不倒的某种中间值。我们把 3 种不同理解也示于表 1 中。稍加分析我们不难断言，理解 B 应是合理的。因为当我们用大震作变形验算，以保证建构建筑物的抗倒性能时，我们不能断言地震动超过大震的水平时建构建筑物的抗倒性能，即验算的大震实际上是一种上限。用小震作强度设计标准情况与此类似。以下讨论时仅以大震为讨论目标。

对比上述不同定义和不同理解，似可得出如下结论：定义 A 对应理解 A，且用可能在场地产 生大震以上地震动的地震震级和距离的期望值规定假想地震。其物理实质是超过与指定超越概率相对应的加速度峰值的期望地震；定义 B 对应理解 B，且用恰能在场地产生大震地震动或烈度的震级和距离的期望值规定假想地震，其性质为与指定概率相对应的加速度峰值的期望地震。

表 1 3 水准设防的理解			
超越概率(50 年)	63%	10%	3%
理解 A	不坏	可修	不倒
理解 B	不坏	可修	不倒
理解 C	不坏	可修	不倒

与定义 A 相比，定义 B 规定的概率一致的假想地震无疑更符合概率一致的本意。若建筑物的抗震性能可由某一地震动参数（如峰值加速度）唯一地确定，则至此问题可简单地解决，但实际情况并非如此。潜源中可以在场地产生某种大震地震动参数的震源可有一系列的震级-震中距组合，这些不同的震源对建筑物的影响并不相同。之所以不任取其一作为抗震设防的目标地震，而引入“期望”地震之类的概念，主要原因可能是考虑到可能震源对建筑物的不同影响。若以恰能在场地产生大震的所有可能地震作为设防目标，则仅以其期望地震验算建构建筑物的抗倒性显然是不够的。例如，对于具重要意义的反应谱而言，由于期望地震是远震和近震的平均，对长周期结构，上述期望地震将低估低频成分；对短周期结构，上述期望地震将低估高频成分。一个自然的想法是，在确定了大震可能的震级-距离组合后，按不同的结构选择不同的保守地震来考虑抗震设防。

2 峰值加速度概率一致的保守反应谱和保守地震

为了更清楚地说明上述不同性质的期望地震，并引出本文建议的按某单一物理量（地震动参数和烈度等）控制的概率一致的保守地震的概念，我们采用以下简单算例作一说明。

设有一圆形潜在震源，半径为 200 km，潜源内震级上限为 7.5 级，起算震级 4.0 级以上地震的年平均发生率为 0.7， β 值为 1.5，场地处于潜源中心。

采用胡聿贤(1988)给出的衰减公式

$$\lg SA(T) = B_0 + B_1 \cdot \lg(R + 30) + B_2 \cdot M \tag{9}$$

其中的系数列于表 2. 0 s 和大于 3 s 的反应谱系数也许不可靠, 但本文使用该资料仅作为示例. 据危险性分析, 峰值加速度的结果列于表 3.

表 2 衰减系数

周期	B_0	B_1	B_2	周期	B_0	B_1	B_2
0.00	1.288 4	0.657 4	2.182 6	0.60	2.281 2	0.652 8	1.628 1
0.05	0.158 9	0.498 0	2.206 8	0.80	2.949 1	0.764 1	1.700 1
0.10	0.076 9	0.556 8	2.326 2	1.00	3.399 2	0.830 3	1.726 0
0.15	0.120 2	0.547 7	2.232 9	1.40	3.929 4	0.822 4	1.511 9
0.20	0.295 6	0.542 1	2.114 4	2.00	4.294 3	0.782 9	1.310 7
0.24	0.172 4	0.506 7	2.070 1	3.00	4.581 8	0.770 2	1.194 7
0.30	0.505 2	0.504 1	1.913 9	5.00	5.364 7	0.894 8	1.298 0
0.40	0.906 0	0.536 0	1.867 8	8.00	4.374 1	0.563 1	0.879 8
0.50	1.796 0	0.535 5	1.439 1				

以 50 年 3%超越概率峰值加速度 1.75 m/s^2 作为抗震变形验算为例, 我们可以图 1 作示意说明如下: 图 1 中纵坐标为震级, 按潜源的实际情况, 震级下限为 4.0, 上限为 7.5. 横坐标为震中距, 起点潜源内径为 0 km, 终点潜源外径为 200 km. 图中曲线 C_1C_2 是按上述危险性分析所用的峰值加速度的衰减公式, 固定峰值加速度为 1.75 m/s^2 确定的震级-距离组合(忽略衰减公式的不确定性). C_1C_2 线以上地震的发生率为 3%, 这些地震发生时, 场地将产生 1.75 m/s^2 以上的峰值加速度. Kameda 等提出的概率一致的假想地震是指在场地产生 1.75 m/s^2 以上峰值加速度的条件下, 潜源中震级和震中距的期望值, 定性表示于图 1 中的 A 点, 即为超过与指定超越概率相对应的加速度峰值的期望地震. 罗奇峰定义的期望地震, 即与指定超越概率相对应的加速度峰值的期望地震, 在图 1 中用 B_1, B_2 点示意, 指的是恰可在场地产生 1.75 m/s^2 的条件下, 即 C_1C_2 线上的期望地震. 按式(5)和(6)可得一期望地震, 按式(7)和(8)可得另一期望地震. 两次地震(B_1, B_2)一般不会重合.

据上节分析, 我们提出采用更为合理的以某一地震动参数为基础的概率一致的保守地震. 所谓“概率一致”, 此处是指峰值加速度相等的前提, 即 C_1C_2 线上地震的峰值加速度均

等于 1.75 m/s^2 . 位于 C_1C_2 以上部分的潜源, 在场地产生 1.75 m/s^2 以上地震动的概率为 50 年 3%. 在此峰值加速度相同(或概率一致)的前提下, 所谓“保守”是指我们可适当顾及地震波破坏作用的其它因素, 如频率因素或反应谱.

事实上, 从图 1 中 C_1 点沿 C_1C_2 线到 C_2 点, 地震震级从小到大, 同时震中距也从小到大, 这些地震均可在场地产生峰值加速度为 1.75 m/s^2 的地震动, 但其反应谱各不相

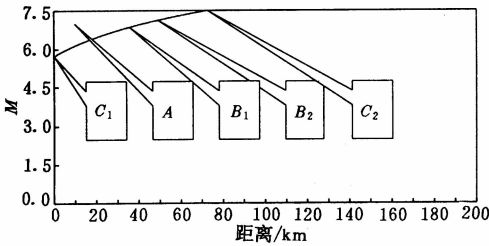


图 1 峰值加速度概率(50 年 3%)一致的震级-距离组合

同. 对于特定结构, 若以特征周期 T_i 代表, 按反应谱 T_i 的衰减公式, 比较 C_1C_2 线上的地震在场地产生的反应谱, 不难找到其中的最大值 $SA(T_i)$, 并记下产生该 $SA(T_i)$ 的震级-距离对应的 $M(T_i), R(T_i)$. 我们称 $M(T_i), R(T_i)$ 对应的地震为结构 T_i 的以峰值加速度控制的概率一致的保守地震. 有 $M(T_i)$ 和 $R(T_i)$, 据衰减规律, 我们可以得到该地震的其它地震动参数或时程. 改变周期 T_i , 按上述处理, 我们可得到不同周期的反应谱的最大值 $SA(T)$, 称为峰值加速度概率一致的保守反应谱, 及与各周期 T 最大反应谱对应的震级-距离组合 $M(T), R(T)$, 即不同周期 T 的峰值加速度概率一致的保守地震.

对本节中的圆形潜源的例子作上述分析处理, 并对 50 年超越概率 10% 和 63% 作同样的处理, 结果如下. 有关的震级-距离组合(或保守地震)的参数列于表 4. 相关的反应谱示于图 2.

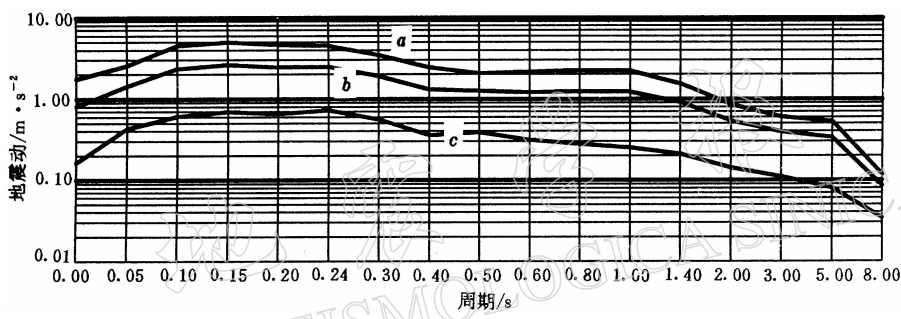


图 2 峰值加速度概率一致的保守反应谱. 曲线 a 为 50 年超越概率 3%, 曲线 b 为 50 年超越概率 10%, 曲线 c 为 50 年超越概率 63%

表 4 不同周期的峰值加速度概率一致的保守地震及其反应谱

周期/s	50 年超越概率 63%			50 年超越概率 10%			50 年超越概率 3%		
	震中距 /km	震级	地震动 /m · s ⁻²	震中距 /km	震级	地震动 /m · s ⁻²	震中距 /km	震级	地震动 /m · s ⁻²
0.00	0.9	4.20	0.163	1.7	5.30	0.812	53.3	7.20	1.754
0.05	0.9	4.20	0.432	1.7	5.30	1.439	1.5	5.80	2.587
0.10	0.9	4.20	0.611	1.7	5.30	2.358	1.5	5.80	4.538
0.15	0.9	4.20	0.698	1.7	5.30	2.637	1.5	5.80	5.019
0.20	0.9	4.20	0.663	1.7	5.30	2.477	1.5	5.80	4.681
0.24	0.9	4.20	0.728	1.7	5.30	2.489	1.5	5.80	4.515
0.30	0.9	4.20	0.564	1.7	5.30	1.923	1.5	5.80	3.475
0.40	0.9	4.20	0.357	1.7	5.30	1.323	1.5	5.80	2.479
0.50	199.5	7.09	0.393	115.9	7.50	1.250	72.6	7.50	2.077
0.60	199.5	7.09	0.313	115.9	7.50	1.209	72.6	7.50	2.147
0.80	199.5	7.09	0.279	115.9	7.50	1.240	72.6	7.50	2.259
1.00	199.5	7.09	0.254	115.9	7.50	1.213	72.6	7.50	2.230
1.40	199.5	7.09	0.211	115.9	7.50	0.907	72.6	7.50	1.547
2.00	199.5	7.09	0.142	115.9	7.50	0.540	72.6	7.50	0.857
3.00	199.5	7.09	0.112	115.9	7.50	0.398	72.6	7.50	0.607
5.00	199.5	7.09	0.081	115.9	7.50	0.338	72.6	7.50	0.534
8.00	199.5	7.09	0.034	115.9	7.50	0.086	72.6	7.50	0.118

从图和表中我们看到,在本例中,构成反应谱包络的主要是直下型地震和远震的两个极端. 50 年 63% 的保守反应谱由震中距 0.9 km 处 4.2 级地震和 199.5 km 处 7.09 级地震组成, 50 年 10% 的保守反应谱由震中距 1.7 km 处 5.3 级地震和 115.9 km 处 7.5 级地震组成, 50 年 3% 的保守反应谱由震中距 1.5 km 处 5.8 级地震和 72.6 km 处 7.5 级地震组成. 周期小于 0.4 s 的高频段由直下型地震控制, 周期大于 0.4 s 的低频段由远震控制. 这种情况具有一定的普遍性, 给抗震设防和验算带来很大的方便, 尽管并非所有情况都仅由两次地震控制. 一般而言, 反应谱包络是由由近到远的一系列地震组成并控制.

3 结论与讨论

笔者分析指出, Kameda 等概率一致的假想地震、期望地震或设定地震的概念, 由于对概率法设防标准的理解不确切, 并非概率一致. 罗奇峰的相应概念符合概率一致, 但由于保留平均意义, 结果仍然不理想. 本文在分析指出已有工作存在问题的基础上, 提出了概率一致保守地震的概念, 供抗震分析作参考. 以下几点为本方法的说明和讨论:

(1) Kameda 等概率一致的假想地震, 本质上是试图在概率法基础上选择有物理意义的实际地震作为抗震设防的目标地震, 以弥补概率法的不足. 在这方面, 本文提出的新思路或新方法有所进步. 但应该指出, 概率法综合所有潜源的影响, 与实际目标地震有本质的区别和矛盾. 因而, 目标地震不能取代概率法的结果, 弥补也只能是一定意义上的弥补. 由于衰减规律的差异, 峰值加速度与反应谱相应的震级-距离组合不可能相同. 因而, 用现行危险性分析的概率法得到的一致概率谱, 不可能有对应的实际地震.

(2) 概率法危险性分析可对任何建有衰减规律的物理量进行, 如峰值加速度、反应谱、烈度乃至地震动持续时间等. 在对某物理量(以峰值加速度为例)作危险性分析, 并按某概率水平确定其设防标准后, 由峰值加速度衰减规律和潜源状况确定对应于该标准的地震或震级-距离组合, 此种震级-距离组合对应的地震对峰值加速度是概率一致的; 在此基础上, 我们建议兼顾其它物理量(本文考虑反应谱)的破坏作用, 选择保守地震取代期望地震, 以更好地满足设防标准的要求. 但由于各种物理量的衰减规律均是独立的统计规律, 没有内在的确定关系, 加之潜源概率贡献叠加情况复杂, 互换控制和兼顾物理量, 所得结果一般不会有明确的固定关系. 本文使用峰值加速度作为控制物理量是因为它使用最广泛, 一些国家的区划图中也以峰值加速度作为主要参数. 作为弥补控制, 反应谱无疑是首选的, 其重要性充分体现于世界各国的抗震规范.

(3) 应该说明的是, 危险性分析中常以反应谱作为地震动参数进行计算, 一致概率法正是这样做的. 如前所述, 本文的做法属于引言中的第 3 种做法, 该方法不完全兼容概率法, 而只接受概率法的部分结果. 二者思路不同, 结论也不同.

(4) 本文的保守反应谱与一致概率谱相比, 一般偏安全. 但根据衰减规律, 在与该概率水平对应的峰值加速度的水平下, 与保守反应谱对应的地震确实可能发生, 且保守反应谱并不绝对保守. 考虑衰减的离散, 应还有更保守的可能. 从这种意义上说, 以保守反应谱验算重要工程的抗震性能是适当的. 若规范谱以实际加速度记录的包络为基础, 则本文的保守反应谱与规范谱的基础是类似的, 因为衰减规律也以加速度记录为基础. 与之相反, 一致概率谱依据潜源概率贡献的叠加, 与规范规定的反应谱没有明确的关系, 且与规范规定的反应谱相比通常偏危险. 若考虑与规范的关系, 一致概率谱与规范谱差异较大.

现行地震安全性评价与规范尚有不少矛盾，引人注目，如何恰当处理尚有待进一步研究。

作为一种新的方法，本文给出了“概率一致的保守地震”或“以指定概率峰值加速度控制的保守地震”的框架。有些实际问题，如衰减规律的不确定性、进一步控制地震波持续时间的可能性、本文建立的新方法与现行危险性分析一致概率法及现行规范的关系等，还有待进一步讨论。

参 考 文 献

- 蔡长青, 沈建文, 1998. 基于有物理意义地表地震动的一致概率法. 地震学报, **20**(3): 1~7
高孟潭, 1994. 潜在震源区期望震级和期望距离及其计算方法. 地震学报, **16**(3): 346~351
胡聿贤, 1988. 地震工程学. 北京: 地震出版社. 205
罗奇峰, 1996. 概率一致设定地震及其估计方法. 地震工程与工程振动, **16**(3): 22~29
Cornell C A, 1968. Engineering seismic risk analysis. *Bull Seism Soc Amer*, **58**: 295~315
Kameda H, Nojima N, 1988. Simulation of risk-consistent earthquake motion. *EESD*, **16**(7): 1 007~1 019

地震学报
ACTA SEISMOLOGICA SINICA