

徐丹丹、吕悦军、荣棉水等, 2012, 考虑地震环境影响的高层建筑设定地震研究, 中国地震, 28 (3), 285 ~ 293。

# 考虑地震环境影响的高层建筑设定地震研究

徐丹丹 吕悦军 荣棉水 谢卓娟 张力方

中国地震局地壳应力研究所, 北京市海淀区安宁庄路 1 号 100085

**摘要** 以烟台地区一高层建筑为研究对象, 结合概率地震危险性分析结果, 确定出不同周期下的最大贡献潜源区。再利用震级空间联合概率分布函数以及震级、震中距计算公式计算设定地震震级和震中距, 并结合研究区的地震地质背景、发震断裂及其活动性等特征, 给出设定地震的具体空间位置。最后根据震级、震中距以及地震动衰减关系确定设定地震反应谱。该方法得到的结果能够直接反映地震危险性, 有利于获得考虑地震环境影响的基岩地震动输入参数。此外, 还可以为研究区自振周期小于 6s 的建(构)筑物的抗震设防提供参考依据。

**关键词:** 设定地震 反应谱 高层建筑 潜在震源 震级空间联合概率分布函数,

[文章编号] 1001-4683(2012)03-0285-09 [中图分类号] P315 [文献标识码] A

## 0 引言

近几十年来, 随着国内大型水坝、核电站、海洋平台以及其他重大工程的兴建, 抗震设防问题越来越重要。而确定地震动参数的经验统计方法已不能满足抗震设防的要求, 因此需要进行专门的地震危险性分析。确定地震动参数的方法大致分为两种, 一是地震危险性概率分析方法, 二是确定性分析方法。地震危险性概率分析是目前使用最广泛的方法, 但其分析结果只给出地震动强度, 不能给出震中距、震级, 也不能提供工程所要的地震动时程等参数。确定性方法不考虑地震的复发周期, 其结果过于保守, 并且它需要在场址区的地震地质环境和活动断层特征等方面开展大量现场研究, 由于投入过大, 其推广使用受到限制。

为了更好地满足震害预测以及工程应用的需要, Ishikawa 等(1991) 在第 4 届国际地震区划大会上首次明确提出设定地震(Scenario Earthquake) 的概念, 并将其定义为能够替代地震危险性概率分析结果的具体地震。它具有确定的震级、震中距及超越概率水平, 能为工程结构的抗震设计和验算提供表征地面运动峰值、反应谱、持时等设计地震动参数的明确地震事件。设定地震综合了概率性和确定性方法的优点, 将概率地震危险性分析结果与物理意义明确的具体地震相联系, 具有明确的震级、震中距、构造位置和概率水平。本文以烟台地区一高层建筑为例, 对其进行设定地震研究, 确定了某一超越概率对应的设定地震动参数,

[收稿日期] 2012-06-06

[项目类别] 中国地震局地壳应力研究所基本科研业务专项(ZDJ2011-14)、国家自然科学基金项目(51208474) 共同资助

[作者简介] 徐丹丹, 女, 1987 年生, 硕士研究生(在读), 主要从事工程地震方面的研究。

E-mail: xudanhope@163.com

并给出设定地震反应谱。

## 1 设定地震的确定原则及方法

### 1.1 确定原则

以地震危险性概率分析结果为前提,综合考虑研究区的地震环境,确定贡献量最大的潜在震源,在最大贡献潜在震源内寻找贡献量最大的震级档,进而产生设定地震。此外,设定地震应具有明确的物理意义和构造位置。

### 1.2 确定方法

#### 1.2.1 最大贡献潜在震源的确定

潜在震源区  $S_l$  对场址地震危险性的贡献量可以通过该潜在震源发生地震时,潜源内所发生的地震,影响场址的地震动值  $Y$  超过给定值  $y$  的年超越概率  $P_l(Y \geq y)$  来表示。基本公式如下(胡聿贤,1999)

$$P_l(Y \geq y) = 1 - \exp \left\{ - \frac{2\nu}{\beta} \sum_{i=1}^{N_s} \sum_{j=1}^{N_m} \iiint P(Y \geq y/E) f(\theta) \frac{f_{l,M_j}}{A(S_l)} f(M_j) \sinh \left( \frac{1}{2} \beta \Delta M \right) dx dz d\theta \right\} \quad (1)$$

式中  $A(S_l)$  为统计区内第  $l$  个潜在震源的面积,  $P(Y \geq y/E)$  为地震统计区第  $l$  个潜在震源区内发生某一特定地震事件(震级  $M_j + 0.5\Delta M$ 、震中位置  $(x, z)$ 、破裂方向确定)时给定地震动值  $y$  被超过的概率,  $\nu$  为年平均发生率,  $N_m$  为震级分档,  $N_s$  为地震带内潜源总数,  $f_{l,M_j}$  为震级档  $M_j$  的地震空间分布函数,  $f(M_j)$  为统计区内震级分布函数,  $f(\theta)$  为破裂方向的概率密度函数,  $\Delta M$  是震级分档间隔,  $\sinh \left( \frac{1}{2} \beta \Delta M \right)$  为以  $\frac{1}{2} \beta \Delta M$  为变量的正弦双曲函数,  $\beta = b \ln 10$ 。

根据上述公式可以计算研究区域内所有潜在震源对场址的贡献量,并确定出贡献量最大的潜在震源。目前的地震危险性概率分析中对最大贡献潜源的确定方法主要是考虑潜在震源区对场址的综合影响,把超过最大给定地震动值的那个潜在震源区作为最大贡献潜源,而不是在不同周期值处对潜在震源贡献量的排序。实际上,在不同周期下,随着潜在震源距离场址远近的不同,它们对场址的贡献量会发生变化。近源对短周期部分的贡献量明显,远源对中长周期部分贡献量大。对于不同的周期,贡献量最大的潜在震源区有时也会发生变化。因此需要确定在不同周期下对场点贡献量最大的潜在震源区。

#### 1.2.2 震级、震中距的确定

潜在震源区各震级档对场点地震危险性的贡献与潜在震源区震级空间联合概率分布函数密不可分,概率的大小反映其贡献量的多少。下面是确定联合概率分布函数的具体步骤。

(1) 计算最大贡献潜源震级概率分布函数。

地震带  $M_j$  档的地震年平均发生率  $\nu_{M_j}$  表示为(胡聿贤,1999)

$$\nu_{M_j} = \frac{2\nu \exp(-\beta(M_j - M_0)) \sinh \left( \frac{1}{2} \beta \Delta M \right)}{1 - \exp(-\beta(M_{uz} - M_0))} \quad (2)$$

式中  $\nu$  是地震带内地震年平均发生率,  $M_j$  为分档间隔中心对应的震级值,  $M_0$  为起算震级,一般取 4.0,  $M_{uz}$  为地震带的震级上限,  $\beta$  同式(1)。

那么,地震带内第  $l$  个潜在震源区各震级档年平均发生率则为

$$\nu_{l, M_j} = \nu_{M_j} f_{l, M_j} \quad (3)$$

最后可以得到第  $l$  个潜在震源区震级概率分布函数为

$$P_l(M_j) = \frac{\nu_{l, M_j}}{\sum_{j=1}^{N_m} \nu_{l, M_j}} \quad (4)$$

(2) 给定地震动加速度条件下,计算设定地震的空间位置概率分布函数。

在地震危险性分析中通常认为在震源区内地震在空间上均匀分布,而设定地震的确定要充分考虑到发震构造的存在,但上述方法按面积确定发震概率时忽略了断层的影响。因此,以长度  $L_j$  代替面积  $A_j$ ,按  $L_j$  的计算结果来选择设定地震的方法更符合地震地质依据,也更合理(陈厚群等,2005)。设主干断裂在潜在震源全长  $L$ ,  $L_j$  为第  $j$  震级档条件下使场址  $Y \geq y$  的长度。在给定地震动加速度的前提下,设定地震的空间位置概率分布函数为

$$P_s(M_j | Y \geq y) = \frac{L_j}{\sum_{j=1}^n L_j} \quad (5)$$

式中  $n$  为满足  $Y \geq y$  的震级档数。

(3) 在给定地震动加速度条件下,确定潜在震源区的震级空间联合概率分布函数。

潜在震源区震级空间联合概率分布函数  $P(M_j | Y \geq y)$  是该潜在震源震级概率分布函数  $P_l(M_j)$  与空间位置概率分布函数  $P_s(M_j | Y \geq y)$  的乘积,经归一化表示为

$$P(M_j | Y \geq y) = \frac{1}{Q} P_l(M_j) P_s(M_j | Y \geq y) \quad (6)$$

式中  $Q$  为归一化系数。

在不同的周期下(以  $T = a, b$  为例),潜在震源对场点的贡献量是不同的,因此,最大贡献潜源也会随之变化。下面分两种情况来讨论设定地震震级和震中距的计算公式。

① 贡献量最大的潜源如果相同,那么在给定年超越概率下,分别以  $T = a, b$  时的地震动加速度值为给定值,可以形成两条震级空间联合概率分布函数,与峰值对应的震级档贡献量最大,设定地震震级将从此震级档产生(韩竹君,1997)。一般情况下,由于与  $T = a, b$  时的两条曲线峰值对应的震级档并不相同,因此,设定地震的震级  $M_{(a,b)}$  和震中距  $R_{(a,b)}$  由下式给出

$$\begin{aligned} M_{(a,b)} &= \frac{M_a P_a + M_b P_b}{P_a + P_b} \\ R_{(a,b)} &= \frac{R_a P_a + R_b P_b}{P_a + P_b} \end{aligned} \quad (7)$$

其中,  $M_a, R_a, P_a$  和  $M_b, R_b, P_b$  分别是与  $T = a, b$  时的震级空间联合概率分布函数曲线峰值对应的震级、震中距和概率。

② 贡献量最大的潜源如果不同,那么至少要确定两个设定地震才能反映区域范围内所有潜源对场点的作用。此时,设定地震的震级和震中距则是从不同周期的震级空间联合概率分布函数曲线峰值处直接获取。

### 1.2.3 空间位置的确定

目前,在地震危险性概率分析方法中,一般都假定地震在潜在震源区内均匀分布。从该假定出发,设定地震的位置可以是以场点为圆心、设定地震的震中距为半径,同时包含潜在震源区在内的圆内或圆弧上的任意一点。但是设定地震的确定不仅需要知道它们的震级和震中距,还要知道它们的精确位置(Ishikawa et al, 1991)。事实上,地震活动在潜在震源区内的分布有着明显的不均一性(胥广银等, 1996)。胡银磊等(1996)对中国东部  $M_s \geq 6.0$  地震震中与发震断层距离的统计分析结果表明,地震震中在断层倾向一侧 2km 处的分布概率最大。该成果是确定设定地震空间位置的基本依据。

## 2 实例分析

研究场址位于烟台地区中朝准地台与扬子准地台的结合部位,按照要求,区域范围为以工程场地为中心、半径不小于 150km 的地区,考虑到地震构造完整性以及其对工程场地的影响,实际研究范围有所扩大。以第 4 代《中国地震动参数区划图》(国家质检总局, 2001)的参数为依据,综合考虑第 5 代区划图中潜在震源区的划分方案,研究区域潜在震源区划分如图 1 所示。

本文所研究的场址建有 3 栋商务公寓、1 栋综合塔楼及周围的一层裙楼,地面以上最高建筑超过 200m。根据计算,最高建筑的自振周期取  $T = 4s$  (中华人民共和国建设部, 2010)。此外,由于此建筑主体结构高度约 100m 且周边的裙楼为矮层建筑,本文在 50 年超越概率为 10% 的条件下,以  $T = 0.1, 2.0, 4.0s$  等 3 个不同周期为例进行研究。

采用地震危险性概率分析,可以获得超高层建筑在不同超越概率下的基岩地震动加速度。衰减关系采用下式<sup>①</sup>

$$\ln Y = C_1 + C_2 M + C_3 M^2 - C_4 \ln [R + C_5 \exp(C_6 M)] \quad (8)$$

式中  $Y$  是加速度峰值或反应谱值,  $R$  为震中距,  $M$  为震级,  $C_1, C_2, C_3, C_4, C_5, C_6$  为回归系数。部分典型周期处衰减关系列于表 1。

表 1 部分典型周期处衰减关系系数

	周期	$C_1$	$C_2$	$C_3$	$C_4$	$C_5$	$C_6$	$\sigma$
长轴	0.000	0.730	2.228	-0.060	1.980	0.311	0.643	0.414
	0.040	1.182	2.117	-0.053	1.982	0.311	0.643	0.396
	0.100	3.393	1.629	-0.025	1.906	0.311	0.643	0.414
	2.000	-2.137	2.102	0.000	1.911	0.311	0.643	0.532
	4.000	-4.059	2.284	0.000	1.917	0.311	0.643	0.583
	6.000	-4.985	2.369	0.000	1.935	0.311	0.643	0.642
短轴	0.000	-0.735	2.126	-0.056	1.677	0.094	0.732	0.414
	0.040	-0.282	2.013	-0.049	1.679	0.094	0.732	0.396
	0.100	1.977	1.532	-0.022	1.615	0.094	0.732	0.414
	2.000	-3.670	2.045	0.000	1.618	0.094	0.732	0.532
	4.000	-5.598	2.227	0.000	1.622	0.094	0.732	0.583
	6.000	-6.537	2.309	0.000	1.638	0.094	0.732	0.642

<sup>①</sup>中国地震局地球物理研究所, 2005, 地震安全性评价研究与结构抗震研究项目研究报告

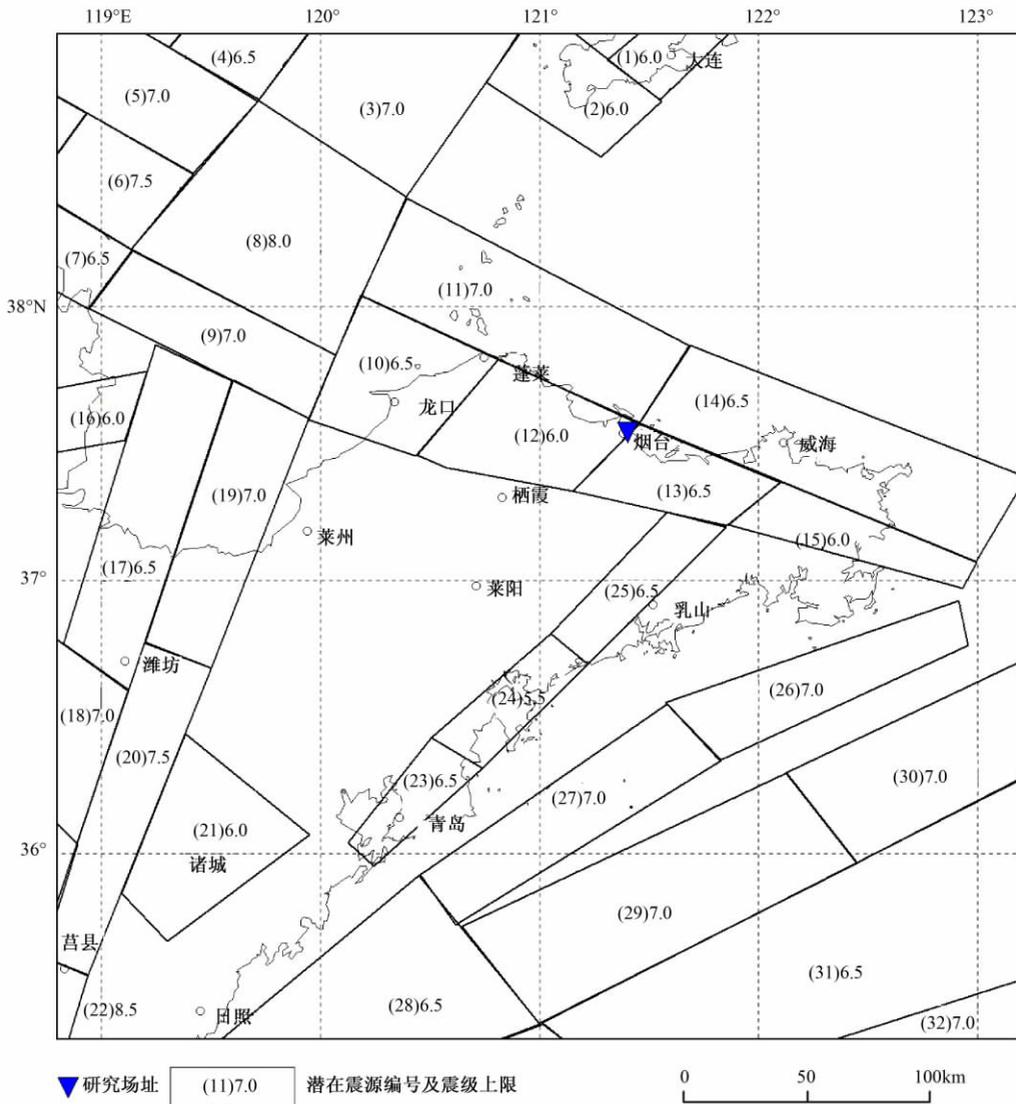


图 1 研究区潜在震源划分图

### 2.1 确定最大贡献潜在震源

利用年超越概率计算公式,可以获得在不同周期条件下各个潜源对场点的贡献量(图 2)。

从图 2 可以看出,随着周期  $T$  逐渐变大,远距离潜在震源的相对贡献概率由小变大,而近距离潜在震源则由大变小。由此可见,一个潜源对场址的贡献率是随着周期的大小而发生变化的。在图 2(a)中,地震动加速度小于 170gal 时,13 号潜源贡献最大,在 170 ~ 400gal 区间时,11 号潜源贡献最大。通过地震危险性概率分析得到,在 50 年超越概率 10% 条件下,  $T=0.1、2.0、4.0$  s 时的加速度分别为 179.2、42.5、21.1gal。在  $T=0.1$  s 时,潜在震源对场点的贡献量是以地震动加速度 179.2gal 为前提对潜源的排序,故 11 号潜源暂时定为最大

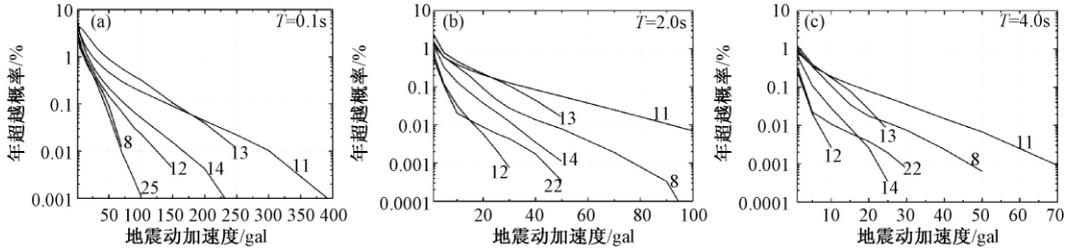


图2 主要潜在震源对场址的贡献量

贡献潜源。此外,还考虑到11、13号潜源的震级上限分别是7.0、6.5,最终在 $T=0.1s$ 时,把11号潜源确定为最大贡献潜源。在 $T=2.0、4.0s$ 时,从图2(b)、2(c)可见,11号潜源是区域内唯一的贡献量最大的潜在震源。因此,代表研究区域内所有潜在震源影响的设定地震应该从11号潜源中产生。

### 2.2 设定地震的震级和震中距

为了保证设定地震的精度,在计算震级分档数时,取 $\Delta M$ 为0.1。根据式(3)计算获得11号(蓬莱-烟台)潜在震源区不同震级档震级分布概率曲线(图3)。

在50年超越概率为10%情况下,分别以 $T=0.1、2.0、4.0s$ 时的地震动加速度为给定值,得到3条震级空间联合概率分布函数曲线(图4)。由图4可见,3条曲线峰值出现的范围基本重叠,读取3个周期峰值处对应的震级 $M$ 和概率 $P$ ,把3个周期处的加速度值和震级代入衰减关系 $Y=Y(M,R)$ ,可以反算出对应的震中距 $R$ ,结果列于表2。按照式(6)进行震级、震中距的计算,并在相应震级档内对结果进行适当微调,最后获得设定震级 $M$ 和震中距 $R$ 分别为 $M_{(0.1,2.0)}=6.5, R_{(0.1,2.0)}=26.4km; M_{(2.0,4.0)}=6.75, R_{(2.0,4.0)}=40.25km$ 。

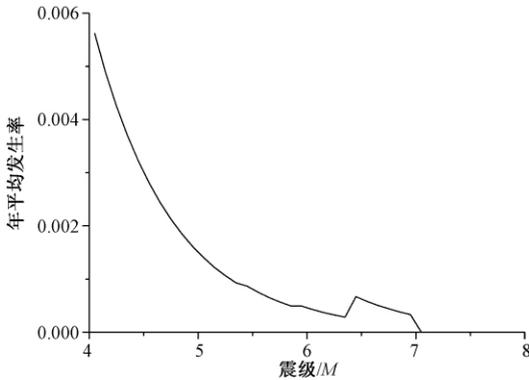


图3 不同震级档地震年平均发生率与震级的关系

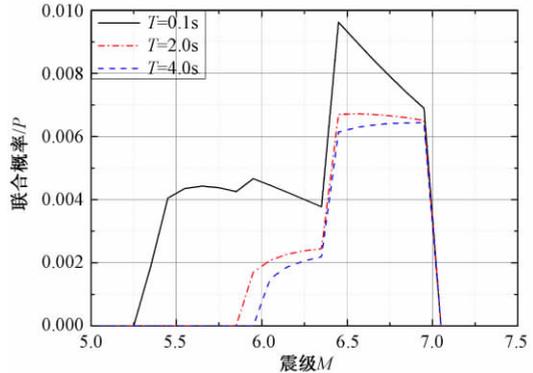


图4 不同震级档地震对场址地震危险性贡献概率分布曲线

表2 与震级空间联合概率分布函数曲线峰值处对应的设定地震参数

周期 (s)	$M$	$R$	$P$
0.1	6.45	24.72	0.009626
2.0	6.55	28.80	0.006724
4.0	6.95	52.20	0.006438

### 2.3 设定地震空间位置的确定

11号(蓬莱-烟台)潜在震源区位于胶东半岛北缘及海域长岛-烟台NW向活动断裂带区域,该断裂带为张家口-渤海-威海断裂带向SE的延伸区段,在区域构造上为胶东隆起与北黄海坳陷的分界断裂带。该潜在震源区综合确定为7.0级潜在震源区(图5)。

潜源区内主要有长岛-芝罘岛断裂及其北侧海域断裂。详细介绍如下:

(1)长岛-芝罘岛断裂。该断裂在芝罘岛及其以东地区控制了岛屿的线型分布,在断裂西段的蓬莱、红石山、钢井一带,断裂断错了新近纪至早更新世玄武岩,属于第四纪活动断裂(吕悦军,2008)。在历史上发生过1687年 $4\frac{3}{4}$ 级地震。未来百年最大潜在地震能力较小,可不考虑为发震构造<sup>②</sup>。

(2)长岛-芝罘岛北侧海域断裂。该断裂走向 $298^\circ$ ,倾向NE,活动性质为正断层,属于NW向张家口-蓬莱断裂带,控制了NW向岛屿、海峡和水槽的发育。在历史上发生过1548年7级地震和1621年 $5\frac{1}{4}$ 级地震,现代中小地震沿断裂带呈带状分布(吕悦军,2008)。此断裂判定为晚更新世-全新世断裂。未来百年最大潜在地震能力为7.0级。

分析对比上述两个断裂的最新活动时代、活动性等特征,可以发现长岛-芝罘岛北侧海域断裂相对危险性更高,因此把设定地震放在此断层上。

### 2.4 反应谱确定

已知设定地震的震级、震中距,利用上述衰减关系,可以得到不同概率水平下建筑场址的地震动反应谱。下面给出在50年超越概率为10%的设防水准下,依本文方法得到的高层建筑场址的设定地震反应谱与一致概率反应谱(图6)。

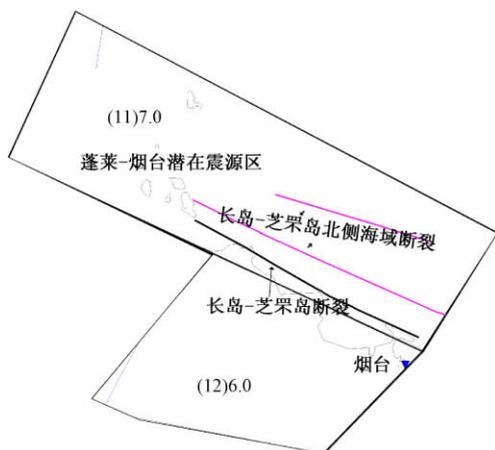


图5 蓬莱-烟台潜在震源区内断裂

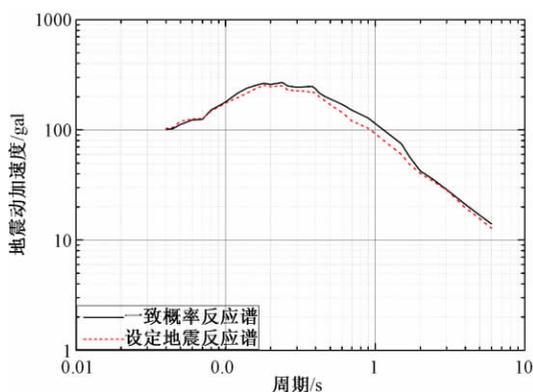


图6 设定地震反应谱及一致概率反应谱(超越概率50年10%)

由于本文研究对象是自振周期较长的高层建筑物,因此,不能单纯地考虑建筑在短周期处的安全性,更应关注反应谱值在中长周期处是否可以给建筑提供一个安全可靠的范围。在设定地震反应谱的计算过程中, $T \leq 2s$ 的谱值采用震级 $M_{(0.1,2.0)}$ 和震中距 $R_{(0.1,2.0)}$ 的设定

<sup>②</sup>中国地震局地球物理研究所,2003,山东核能海水淡化高技术产业化示范工程项目厂址地震调查与评价工作报告

地震所得到的设定地震反应谱中的  $0.04 \sim 2\text{s}$  的值,  $T \geq 2\text{s}$  的谱值采用震级  $M_{(2.0,4.0)}$  和震中距  $R_{(2.0,4.0)}$  的设定地震所得到的反应谱中  $2 \sim 6\text{s}$  的值。从图 6 可以看出,从短周期  $0.04\text{s}$  到长周期  $6.0\text{s}$ , 设定地震反应谱与一致概率反应谱都具有很好的吻合性。

### 3 结语

本文以概率地震危险性分析方法为前提,考虑到潜在震源区对场址的贡献量是随着周期的不同而发生变化的,详细分析了确定最大贡献潜在震源区的方法。在设定地震的确定过程中,综合考虑地震发生概率和空间位置分布的影响,始终遵循从贡献量最大的潜在震源区找出贡献量最大的震级档,进而从中产生设定地震的原则,并使设定地震具有明确的物理意义和构造位置。在此基础上,得到烟台地区高层建筑 50 年超越概率 10% 设防标准下对应的设定地震 ( $M = 6.5, R = 26.4\text{km}$  和  $M = 6.8, R = 40.3\text{km}$ ), 并给出设定地震反应谱。

与概率地震危险性分析结果相比,设定地震具有明确的震级、震中距、构造位置以及概率水平,能够直接地反映地震危险性,并有利于获得考虑地震环境影响的基岩地震动输入参数,是一种较为合理方便的地震危险性分析方法。此外,这种设定地震反应谱把建筑物短周期以及中长周期处的安全性都考虑在内,可以为研究区自振周期小于  $6\text{s}$  的建(构)筑物的抗震设防提供参考依据。

### 参考文献

- 胥广银、高孟潭,1996,潜在震源区内非均匀特性研究,中国地震,12(3),294~299。
- 胡银磊、张裕明、董瑞树等,1996,中国大陆地震 ( $M_s \geq 6.0$ ) 震中与其发震断层距离的统计分析及其在确定潜源区边界中的应用,中国地震,12(2),224~228。
- 国家质检总局,2001,中国地震动参数区划图(GB18306-2001),北京:中国标准出版社。
- 陈厚群、李敏、石玉成,2005,基于设定地震的重大工程场地设计反应谱的确定方法,水利学报,36(12),1399~1404。
- 韩竹君,1997,设定地震及其确定方法研究,博士论文,北京:中国地震局地质研究所。
- 胡聿贤,1999,地震安全性评价技术教程,北京:地震出版社。
- 吕悦军,2008,渤海海域地震区划研究,博士论文,北京:中国地质大学(北京)。
- 中华人民共和国建设部,2010,建筑抗震设计规范(GB50011-2010),北京:中国建筑工业出版社。
- Ishikawa Y, Kameda H, 1991, Probability based determination of specific scenario earthquake, Proc 4th International Conference on Seismic Zonation, 2, 3~10.

## Research on scenario earthquakes for high-rise buildings with the consideration of earthquake environment

*Xu Dandan Lv Yuejun Rong Mianshui Xie Zhuojuan Zhang Lifang*

Institute of Crustal Dynamics, China Earthquake Administration, Beijing 100085, China

**Abstract** The paper studies scenario earthquakes for high-rise buildings. On the basis of the results of probabilistic seismic hazard analysis, the most contributing potential seismic source zone in different periods of vibration was determined. The magnitude and epicentral distance of scenario earthquake were calculated by using the joint distribution function of magnitude-space and the related formula. And then, based on seismo-geological characteristics, causative faults and seismic activity, the specific spatial location of scenario earthquakes were determined. Finally, according to the magnitude, epicenter distance and attenuation relationship the response spectrum of scenario earthquakes were obtained. The results could directly reflect seismic hazard, and help to get the ground motion parameters of bedrock with the consideration of earthquake environment. The results can also provide some references for seismic fortification of high-rise buildings in different periods of vibration.

**Key words:** Scenario earthquake    Response spectrum    High-rise building    Potential seismic source zone    The joint distribution function of magnitude-space