

基于不同设定地震方法的长周期建筑设计反应谱的对比分析¹

徐丹丹^{1,2)} 吕悦军²⁾ 陈阳²⁾ 潘龙²⁾

1) 北京勘察技术工程有限公司, 北京 100192

2) 中国地震局地壳应力研究所, 北京 100085

摘要 现有的设定地震方法主要有两种: 加权平均法和最大概率法。本文首先简要介绍了这两种方法, 然后以烟台地区一高层建筑为研究对象, 分别采用加权平均法和最大概率法进行地震危险性分析, 确定出设定地震震级、震中距以及具体空间位置, 给出了两种方法的设定地震反应谱, 最后对这两种方法所得结果的差异进行了对比和分析。结果表明: 加权平均法所得反应谱将长周期处的安全性考虑在内, 适用于中长周期建(构)筑物; 最大概率法由于其长周期处谱值偏低, 会增加长周期工程的危险性, 不宜用于长周期工程, 但对短周期建(构)筑物应用合理; 对于自振周期不同的建筑工程应选用不同的地震危险性分析方法进行设计反应谱的确定。

关键词: 长周期 设定地震 加权平均法 最大概率法 反应谱

引言

随着建筑业的飞速发展, 高层建筑越来越多, 但是我国有很多城市处于地震频发地带, 地震对建筑物造成的影响尤为突出, 因此, 建筑物尤其是高层建筑的抗震设防问题就显得越来越重要。

目前, 表征抗震设防特点的主要参数是地震动振幅和地震动谱。其中, 地震动振幅峰值的大小反映了地震过程中某一时刻地震动的最大强度; 而地震动谱则表示地震动的频域特征(陈厚群等, 2005)。高层建筑抗震设防中地震动参数的确定方法主要是概率性地震危险性分析, 这种方法的优点是给出了不同震级(或烈度)地震发生的可能性, 以及在感兴趣的场点一定年限内地面运动可能性的估计值。但由于其分析结果给出的是地震动强度大小, 缺乏具体地震的概念, 不能给出地震震中距、震级, 也不能提供工程所要的地震动时程等参数。

为了得到与场址相关的设计反应谱和加速度时程等参数, Ishikawa 等(1991)在第四届国际地震区划大会上首次提出了设定地震(Scenario Earthquake)的概念。随后, McGuire(1995)提出了基于概率的设定地震方法, 具体步骤是结合综合概率法的结果, 给出某超越概率对应

1 基金项目 中央级公益性科研院所基本科研业务项目资助(ZDJ2012-12)

[收稿日期] 2013-03-16

[作者简介] 徐丹丹, 女, 生于1987年。硕士研究生。主要从事工程地震方面的研究。E-mail: xudanhope@163.com

的能在场址产生给定地震动值的具体地震。90年代以来,国内一些学者也一直在探讨这种能结合概率性和确定性优点的地震危险性分析方法。高孟潭(1994)结合我国地震危险性分析的特色,推导出了潜源区震级和空间联合分布函数,并建立了确定设定地震期望震级和期望震中距的方法。韩竹军(1997)、陈厚群等(2005)、张翠然等(2010)学者从各个方面对设定地震方法进行了讨论研究。

设定地震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,其结果可以为研究区建筑物的抗震设防提供参考依据。本文在前人已有的工作基础上,以烟台地区一高层建筑为研究对象,分别采两种不同的设定地震方法进行地震危险性分析,确定出设定地震震级、震中距以及具体空间位置,同时给出了这两种方法的设定地震反应谱并探讨其适用性。

1 设定地震的确定方法

根据地震震级和震中距的确定方法的不同,现有的设定地震可以归纳为加权平均法和最大概率法(钟菊芳等,2005a)。

1.1 加权平均法

加权平均法是在最大贡献潜在震源内,取在场址产生大于或等于给定参数值($y(p_0)$)的所有可能地震的震级、震中距的期望值,作为设定地震的震级和震中距(钟菊芳等,2005a)。

这种方法是由Ishikawa等(1991)最先开始研究的。他们以最大水平峰值加速度为参数,提出了危险一致震级和震中距的确定方法;高孟潭(1994)结合我国地震危险性分析的特点,推导了潜源区震级空间联合概率分布函数,并给出了潜在震源区期望震级和期望距离的计算公式;针对上述两位学者所给出的设定地震在场址产生的地震动参数值高于给定参数值的情况,罗奇峰(1996)给出了潜在震源区概率一致设定地震的定义及其震级、震中距的确定方法,并指出概率一致性的设定地震震级和震中距以及某一超越概率下场地地震动强度三者之间要满足地震动衰减关系: $Y=g(M,R)$ 。

在不同的周期,地震动衰减关系发生变化。一般而言,在短周期时地震动衰减较快,近源对场地的作用相对突出;但在长周期时,由于地震动衰减较慢,近源作用相对减弱,远源的作用加强(韩竹军等,1999a)。周期不同,潜在震源对场点的贡献量也不同,因此,最大贡献潜源也会随之变化。在最大贡献潜源相同的前提下,韩竹军(1997)提出了设定地震震级 M 、震中距 R 的计算公式为:

$$M = \frac{M_{0.1} \cdot W_{0.1} + M_{1.0} \cdot W_{1.0}}{W_{0.1} + W_{1.0}}$$

$$R = \frac{R_{0.1} \cdot W_{0.1} + R_{1.0} \cdot W_{1.0}}{W_{0.1} + W_{1.0}} \quad (1)$$

式中, $M_{0.1}$ 、 $R_{0.1}$ 、 $W_{0.1}$ 分别表示与 $T=0.1s$ 时的震级边际分布概率曲线峰值对应的震级、距离和概率; $M_{1.0}$ 、 $R_{1.0}$ 、 $W_{1.0}$ 分别表示与 $T=1.0s$ 时的震级边际分布概率曲线峰值对应的震级、距离和概率。

贡献量最大的潜源如果不同,那么至少要确定2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边际分布概率曲线峰值处直接获取。

此方法的确定原则是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,确定出贡献量最大的潜在震源,在最大贡献潜在震源内利用震级空间联合分布函数寻找贡献量最大的震级档,进而产生设定地震。对于高层建筑,周期点只取 0.1s 和 1.0s 已不能反映建筑的长周期特点,这就需要针对建筑物的自振周期取值相应的周期点值。

1.2 最大概率法

最大概率法是在最大贡献潜在震源内,取对场址贡献量最大的地震作为设定地震。

最先进行研究的是 McGuire (1995),他在研究地震危险性分析概率方法以及 Ishikawa 等 (1991) 的设定地震方法基础上指出,根据 Ishikawa 方法获得的设定地震不能在场点产生与地震危险性概率分析结果相吻合的地震动值,而且仅仅峰值地震动强度保持一致也不够,设定地震应使其控制反应谱的整个频域。在我国最具有代表性的是陈厚群等 (2005) 的研究,他针对概率地震危险性分析产生的一致概率反应谱存在的问题和不足,改进了前人的概率性设定地震方法,提出了设定地震的 4 条确定原则,并简述了设定地震的概率含义。他用断层长度 L_i 代替以往按照潜在震源区面积 A_i 来计算设定地震,更符合设定地震的确定要充分考虑发震构造的原则。由设定地震产生的场址加速度反应谱的年超越概率公式为:

$$P(M_{SE}, \Delta_{SE}) = \nu \frac{L_{SE} \cdot f_{L, M_j} \cdot e^{-\beta(M_{SE} - M_0)}}{\sum_{i=1}^n L_i \cdot f_{L, M_j} \cdot e^{-\beta(M_i - M_0)}} \quad (2)$$

式中, ν 为对场地产生给定地震动峰值加速度贡献最大的潜在震源年超越概率值; f_{L, M_j} 为空间分布函数; M_{SE} 为设定地震震级; M_0 为起算震级; L_i 为第 i 震级档地震所对应的发震部位在潜源区主干断裂上所占的长度; L_{SE} 为设定地震所属震级档对应的发震部位在潜源区主干断裂上所占的长度; $\beta = b \times \ln 10$ 。

最后依据最大概率的原则,在可能的设定地震范围内确定出唯一的设定地震。

李山有等 (1999)、聂树明等 (2008)、张翠然等 (2010)、荣棉水等 (2011) 学者对基于概率法的设定地震都有一定的研究。

此外,易立新等 (2004)、钟菊芳等 (2005b; 2011) 学者是直接利用震级空间联合分布函数确定设定地震震级和震中距。

2 应用实例

研究场址位于华北地台与扬子准地台的结合部位。按照要求,区域范围是以工程场地为中心、半径不小于 150km 的地区,考虑到地震构造完整性及其对工程场地的影响,实际的研究范围有所扩大。以第五代《中国地震动参数区划图》潜在震源区划分方案为基础,同时综合第四代区划图的参数,选取华北地区 (118.8°E—123.2°E、35.3°N—39.0°N) 作为研究区域。研究区域潜在震源区划分如图 1 所示。

本文所研究的高层建筑包括 3 栋商务公寓、1 栋综合塔楼以及周围的裙楼等,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)。

(1) 采用加权平均法

此建筑主体结构高度为 100m 左右且周边的裙楼等多为矮层建筑,固本文在 50 年超越概为 10% 的条件下,以 $T=0.1s$ 、 $2.0s$ 、 $4.0s$ 三个不同周期为例进行研究。

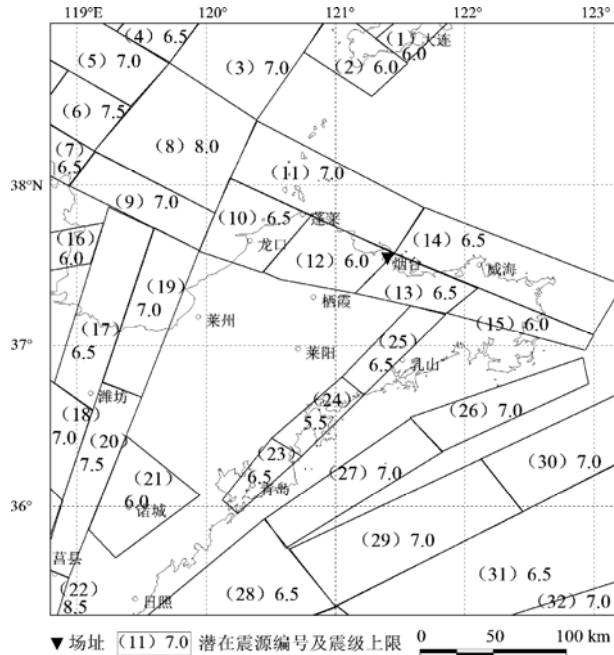


图 1 研究区潜在震源区划分图

Fig. 1 Potential seismic source zone division in study region

在某一概率水平下，对场点地震危险性贡献最大的震级和震中距的组合应该来自于贡献量最大的潜在震源区（韩竹军等，1999b）。因此，首先要确定研究区域内不同周期下对场点贡献最大的潜在震源区。经过计算分析，确定蓬莱—烟台潜在震源区（图 2）为最大贡献潜源，然后可以得到上述 3 个周期下与震级空间联合概率分布函数峰值处对应的设定地震参数，其结果如表 1 所示。

表 1 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

Table 1 Scenario earthquake parameters associated with peak of the joint distribution function of magnitude-space curve

周 期	M	R	P
0.1s	6.5	37.61	0.010342
2.0s	6.5	38.20	0.007664
4.0s	6.9	64.91	0.007388

采用改进后的设定地震震级 $M_{(a,b)}$ 和震中距 $R_{(a,b)}$ 公式（式 3）进行计算。

$$M_{(a,b)} = \frac{M_a \cdot P_a + M_b \cdot P_b}{P_a + P_b}$$

$$R_{(a,b)} = \frac{R_a \cdot P_a + R_b \cdot P_b}{P_a + P_b} \tag{3}$$

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

衰减关系采用下式¹：

$$\ln Y = C_1 + C_2 M + C_3 M^2 - C_4 \ln(R + C_5 \exp(C_6 M)) \quad (4)$$

式中， Y 代表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。

计算获得设定地震震级 M 和震中距 R 分别为 $M_{(0.1,2.0)}=6.5$ 、 $R_{(0.1,2.0)}=37.86\text{km}$ 和 $M_{(2.0,4.0)}=6.7$ 、 $R_{(2.0,4.0)}=51.31\text{km}$ 。

已知设定地震的震级、震中距，代入衰减关系计算，可以得到不同概率水平下建筑场址的地震动反应谱。由于本文研究的对象是自振周期较长的高层建筑物，除了考虑建筑在短周期处的安全性以外，还要关注反应谱值在中长周期处是否安全。在设定地震反应谱计算过程中，周期2s之前的反应谱值采用震级 $M_{(0.1,2.0)}$ 和震中距 $R_{(0.1,2.0)}$ 所得到的设定地震反应谱；周期2s之后的反应谱值采用震级 $M_{(2.0,4.0)}$ 和震中距 $R_{(2.0,4.0)}$ 所得到的反应谱。在50年超越概率10%的设防水准下，依上述方法可得到设定地震反应谱如图4。

(2) 采用最大概率法

通过地震危险性概率分析方法可以得到场址50年超越概率10%的峰值加速度为100.4gal，50年超越概率2%的峰值加速度为181.8gal。根据场址周围各潜在震源区的贡献值，可以确定蓬莱—烟台潜在震源区对场址影响最大（图2）。

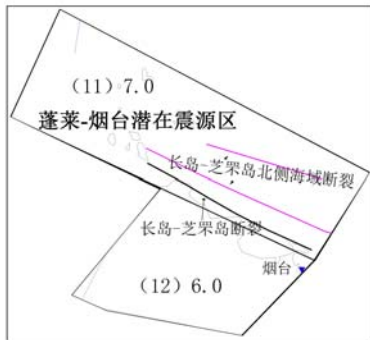


图2 场址最大贡献潜在震源区

Fig. 2 Potential seismic sources with the most effecting contribution to the engineering site

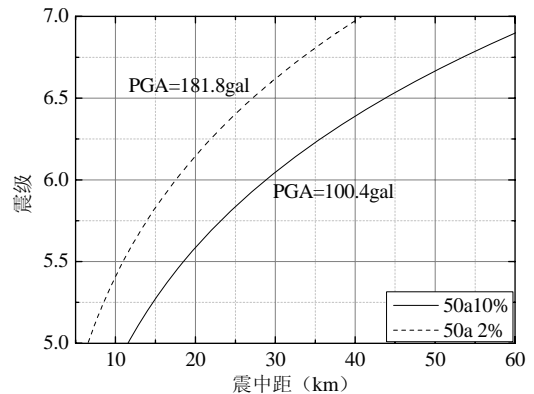


图3 设定地震取值范围

Fig. 3 Parameter range of scenario earthquakes

根据第一节介绍的最大概率法设定地震确定原则和思路，可首先确定设定地震的取值范围。图3为给定加速度值相对应的设定地震的取值范围，曲线上的任意一点代表的地震都能在场址产生给定概率水平的加速度值。

在蓬莱—烟台潜在震源区内，距离场址最近的断裂为长岛—芝罘岛断裂，该断裂未来百年最大潜在地震能力较小，可不考虑为发震构造²。因此距离场址最近的断裂选择北侧的海域断裂，距离约为17km，为设定地震最小震中距 D_{\min} 。在50年超越概率10%的前提下，由衰

1 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。

2 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。

减关系公式可以求得其对应的最小震级 M_{\min} 为 5.4。将潜在震源的震级上限带入公式可求出与震级上限对应的、可在场址产生给定峰值加速度的最大震中距 D_{\max} 为 60.08km。

根据潜在震源区的空间位置以及潜在震源参数等，由式（2）可以求出设定地震的实际发生概率 P ，将两种极端情况列于表 2。根据最大概率法设定地震的确定原则，从可能的地震中选出对设计地震动贡献最大、发震概率最高、位于发震构造上的地震，作为选用的设定地震（陈厚群等，2005）。从表 2 可以看出，在两种情况中设定地震（ $M=6.0$ ， $R=17\text{km}$ ）的概率最大，所以，50 年超越概率 10% 的设定地震可确定为距离场址为 17km 的 6.0 级地震。已知地震震级和震中距，利用选定的衰减关系可以得到此高层建筑的地震动反应谱（图 4）。

表 2 最大和最小设定地震的实际发生概率

Table 2 Real occurrence probability of largest and smallest scenario earthquake

概率水平	设定地震	P
50a10%	$M_{\min}=5.4$; $R=17.00$	2.3334×10^{-4}
	$M_{\max}=7.0$; $R=60.08$	1.3480×10^{-5}

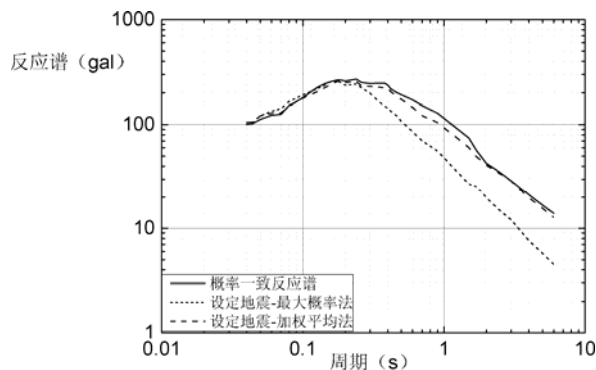


图 4 设定地震反应谱与概率一致反应谱比较（超越概率 50a10%）

Fig. 4 The comparison of scenario earthquake response spectrum and probability-consistent response spectrum with probability of exceedance 10% in 50 years

从图 4 可以看出，由加权平均法得到的设定地震反应谱与概率地震危险性分析得到的概率一致反应谱有较好的吻合度；由最大概率法得到的反应谱与概率一致反应谱有一定差距，其主要体现在最大概率法设定地震反应谱的中长周期段远低于场址的概率一致反应谱。

3 结论

本文首先介绍了目前常用的两种设定地震方法，然后以烟台地区一高层建筑为研究对象，分别采用两种方法进行地震危险性分析，确定出设定地震震级、震中距以及具体空间位置，并给出两种方法的设定地震反应谱，具体结论如下：

（1）对于长周期建筑物，加权平均法设定地震反应谱将建筑物短周期以及中长周期处的安全性都考虑在内，这种谱对于自振周期较长的高层建筑以及大跨度桥梁来说是一种相对安全的方法，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。

（2）最大概率法产生的设定地震反应谱在中长周期处反应谱值明显减小，对于水电站、

大坝等建(构)筑物,由于其自振周期较小,如果设定地震反应谱长周期处的谱值降低,不仅不会给工程应用带来安全隐患,而且还更有利于工程设计。因此,对于自振周期较小的工程建筑选用最大概率法是最优方案。

总体而言,对于自振周期不同的建筑工程应选用不同的地震危险性分析方法进行设计反应谱的确定。

参考文献

- 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.
- 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.
- 韩竹军,1997.设定地震及其确定方法研究[博士学位论文].北京:中国地震局地质研究所.
- 韩竹军,张裕明,于贵华,1999a.如何确定对场地地震危险性贡献量最大的潜在震源区.地震地质,21(4):443—451.
- 韩竹军,张裕明,黄昭,1999b.城市震害预测中设定地震的确定问题.中国地震,15(4):349—356.
- 李山有,廖振鹏,1999.基于概率地震危险性分析的重大工程结构设计地震的研究.工程抗震,3:18—21.
- 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.
- 聂树明,周克森,2008.设定地震及其烈度影响判别.华南地震,28(2):47—52.
- 荣棉水,吕悦军,彭艳菊等,2011.渤海海洋石油平台设定地震反应谱的确定.地震学报,33(3):386—396.
- 易立新,胡晓,钟菊芳,2004.基于EPA的重大工程设计地震动确定.地震研究,27(3):271—276.
- 张翠然,陈厚群,李敏,2010.基于NGA衰减关系的坝址设定地震研究.中国水利水电科学研究院学报,8(1):1—10.
- 钟菊芳,温世亿,胡晓,2011.沙牌坝址基岩场地地震动输入参数研究.岩土力学,32(2):387—397.
- 钟菊芳,胡晓,易立新等,2005a.重大工程设定地震方法研究进展.水力发电,31(4):22—24.
- 钟菊芳,吴胜兴,胡晓等,2005b.新疆克孜尔坝址设定地震研究.河海大学学报,33(4):413—417.
- 中华人民共和国建设部,2010.建筑抗震设计规范(GB 50011-2010).北京:中国建筑工业出版社.
- Ishikawa Y. and Kameda H., 1991. Probability-based determination of specific scenario earthquake. See: Proc. 4th International Conference on Seismic Zonation, 2: 3—10.
- McGuire R.K., 1995. Probabilistic seismic hazard analysis and design earthquake: closing the loop. Bulletin of the Seismological Society of America, 85(5): 1275—1284.

Comparison of Design Response Spectrum for Long Period Structures Based on Scenario Earthquake

Xu Dandan^{1,2)}, Lu Yuejun²⁾, Chen Yang²⁾ and Pan Long²⁾

1) Beijing Explo-Tech Engineering Co., Ltd., Beijing 100192, China

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

Abstract Two kinds of determining method for scenario earthquake are presented in this paper, namely the weighted average method and maximum probability method. This paper briefly introduces the two methods. Then taking a high-rise building in Yantai area as a case study, we use the weighted average method and maximum probability method to realize seismic hazard analysis, determine earthquake magnitude, the epicenter and specific space position, and then give two response spectrums of two methods. By comparing the differences of response spectrum between two methods, we find out that the weighted average method is more suitable for long period structures with considering the safety of long period. Maximum probability method is more suitable for short period structures. It is reasonable to choose corresponding different method when the structures have different natural vibration period.

Key words: Long period; Scenario earthquake; Weighted average method; Maximum probability method; Response spectrum