

随机方法模拟地震动的应用研究

董 娣, 刘 锐, 桑向国

(青岛市工程地震研究所, 山东 青岛 266003)

摘 要:对随机方法模拟地震动的实际应用进行了研究。通过实际模拟验证,此方法简单有效,可为结构抗震设计提供验算依据,同时为设计反应谱的拟合提供参照数据,有一定的实用性,但仍存在一定的不足。

关键词: 随机方法; 模拟; 地震动

中图分类号: P315.9; TU352.1⁺1

文献标识码: A

文章编号: 1000-0844(2006)03-0298-05

Application Research of Simulation of Ground Motion Using the Stochastic Method

DONG Di, LIU Rui, SANG Xiang-guo

(Institute of Engineering Earthquake of Qingdao, Shandong Qingdao 266003, China)

Abstract: The practical application of simulation of ground motion using the stochastic method is studied. It can offer reliable seismic input for seismic design and sufficient data for fitting design response spectrum. Through the practical simulation testing, the result shows that the stochastic method is effectual, simple, and practicability. However, it exists some shortages also.

Key words: Stochastic method; Simulation; Ground motion

0 引言

我国现有建筑抗震设计规范要求^[1]:对于特别不规则的建筑、甲类建筑和超出抗震规范所列高度范围的高层建筑,除了应用反应谱振型分解法进行抗震验算以外,通常应采用时程分析法进行多遇地震下的补充计算。可取多条时程计算结果的平均值与振型分解法计算结果的较大值。而在采用时程分析法时,应按建筑场地类别和设计地震分组选用不少于两组的实际强震记录和一组人工模拟的加速度时程曲线。由于我国大部份地区的实际强震记录很少,也没有比较完备的人工模拟的加速度时程曲线,故此模拟地震动成为研究的一个重点。自从1947年 Housner 首先提出可以将地震看作是一种随机振动以后,中外学者都在这方面做了大量的研究。地震是一种随机过程已为工程界人士所共同认知,因而以随机方法为基础的模拟地震动也应运而生。据此我们可以根据此模拟方法形成一个比较完善的

人工模拟的加速度时程曲线数据库,为各类建筑的抗震设计计算提供充分的验算依据。模拟得到的加速度时程(或加速度图)称为人造地震波^[2]。

1 随机方法概述

人工合成地震波又分为确定性方法模拟和随机方法模拟。由于地震动是一个随机过程,采用随机分析更为合理,有着确定性分析不可替代的优点。该方法的理论基础是源于 Hanks^[3]和 McGuire^[4]的工作,他们假设在弹性半空间内的远场加速度是有限带宽、有限持时的高斯白噪声;而最早 Aki^[5]采用震源谱用一个单角频模型(ω^2 模型)来描述;Boore 等人在此基础上发展了该方法,使其适用于许多双角频震源谱模型^[6],如 AB95^[7]、BC92^[8]、H96^[9]、AS00^[10]等。将震源体简化成点源,将傅氏幅值谱与随机生成的相位谱结合,就可以得到地震动的时程、峰值和反应谱。从工程观点来看,高频地面运动

收稿日期:2006-05-12

作者简介:董娣(1975-),女(汉族),陕西三原人,博士,主要从事结构抗震减灾方面的研究。

在本质上是随机的,因为在高频部分,断层的时间和空间分布已经复杂到足以将震源看作是一个随机序列^[11]。

随机方法其核心是把描述地面运动傅氏振幅谱的参数或函数与一个修正的随机状态反应谱(即目标反应谱)结合起来,这样地面运动就分布在一个与地震震级和震中距有关的持续时间内。此方法独特之处是可以模拟工程师们所感兴趣的高频地面运动($f > 0.1 \text{ Hz}$)。此外,这种方法被广泛的应用于估测世界上某些缺少破坏性地震记录地区的地面运动。这种方法最本质的特征是将我们所了解的影响地面运动的各种因素(震源,路径,场地条件等)简化为一简单的折积函数形式,即 $Y(M_0, R, f)$ 也就是目标反应谱:

$$Y(M_0, R, f) = E(M_0, f) * P(R, f) * G(f) * I(f) \quad (1)$$

此处 M_0 为地震矩 ($M = 2/3 \log M_0 - 10.7$); R 为到断裂面最近的距离,而不是震源距或震中距; f 为频率。其中各因素意义如下:

(1) E 为震源影响:

$$E(M_0, f) = C * M_0 * S(M_0, f) \quad (2)$$

对某一特定场地 C 为一常数,并由以下公式确定:

$$C \leq Rq\Phi > * V * F / (4 * \pi \rho_s \beta 3s * R_0) \quad (3)$$

$S(M_0, f)$ 是震源位移谱,单角频模型和双角频模型的震源位移谱都可以用一个通用的公式来表示:

$$S(M_0, f) = S_a(M_0, f) \times S_b(M_0, f) \quad (4)$$

其中 S_a, S_b 是根据不同的震源谱模型由不同的经验公式确定^[5-10]。

(2) P 为路径影响:

$$P(R, f) = Z(R) * \exp[-\pi * f * R / Q(f)\beta] \quad (5)$$

$Z(R)$ 为地震波几何连续分段传播函数,而每段的长度为 R_1, R_2, \dots, R_n , 由实际数据统计得来; Q 为地震衰减因子,与频率的大小有关; β 为地震波剪切波速。

$$Z(R) = \begin{cases} \frac{R_0}{R} & R \leq R_1 \\ Z(R_1) * \frac{R_1^{p_1}}{R} & R_1 \leq R \leq R_2 \\ \vdots \\ Z(R_n) * (\frac{R_n}{R})^{p_n} & R_n \leq R \end{cases} \quad (6)$$

(3) G 为场地条件,由场地放大函数和场地衰减函数的乘积表示:

$$G(f) = A(f) * D(f) \quad (7)$$

$$\text{其中 } A(f(z)) = \sqrt{Z_s / Z(f)} \quad (8)$$

$$Z_s = \rho_s * \beta_s \quad (9)$$

$$\bar{Z}(f) = \bar{\rho} * \bar{\beta} \quad (10)$$

$$\bar{\rho} = \frac{1}{z(f)} * \int_0^{z(f)} \rho(z) dz \quad (11)$$

$$\bar{\beta} = z(f) * [\int_0^{z(f)} \frac{1}{\beta(z)} dz]^{-1} \quad (12)$$

式中 Z_s —震源阻抗; $\bar{Z}(f)$ —地表阻抗; $\bar{\rho}$ 土层平均密度; ρ_s —震源密度; β_s —震源剪切波速。

$$D(f) = [1 + (f/f_{max})^8]^{-1/2} \quad (13)$$

(4) I 为运动类型影响:

$$I(f) = (2 * \pi * f * i)^n \quad (14)$$

$n=0, 1, 2$ 分别对应于地面位移、速度、加速度; $i = \sqrt{-1}$ 。

模拟地震动的随机方法可以简化为六步进行^[12], 第一步,根据给定的持续时间生成白噪声(图 1(a)); 第二步,进行窗函数限频(图 1(b)),所采用的函数为加速度时程包络线; 第三步,将限频以后的白噪声转化到频域内得到傅里叶谱(图 1(c)); 第四步,利用振幅谱的均方根来对其进行标准化(图 1(d)); 第五步,标准化以后的振幅谱与目标反应谱相乘得到一修正后的傅里叶振幅谱(图 1(e)); 第六步,将修正后的傅里叶振幅谱转化到时域内便得到所模拟的地震动,即加速度时程(图 1(f))。以上为随机方法模拟地震动的过程。

2 人工模拟地震动及其模拟实例

2.1 应用随机方法中的改进

本文在应用上述随机方法时做了一定的改进。在模拟过程的第二步,即对输入的白噪声进行窗函数限频时,将原有的加速度时程包络线函数 $f(t) = at^b e^{-ct}$ 更改为 $f(t) = ae^{bt} \sin(ct)$,更改以后的时程包络线函数更符合实际的地震波形状。

2.2 随机方法的精度检验

为了确保此方法的适用性,首先对其精度进行了验证。在此采用 5 组参数,见表 1(按震级、距离以及场地参数分类)。对同样的一组参数,即相同的目标反应谱,计算 1 000 条加速度时程,进而得出 1 000 条速度时程;根据所得到的时程曲线,可以得到相应的 1 000 个加速度峰值以及速度峰值,也就是 PGA 和 PGV;另外可以确定 1 000 个震动持时。在震动持时的确定中我们采用如下方法^[4]:在所模拟得到的加速度时程 $a(t)$ 中,其加速度峰值假定为 A_{max} ,做两条直线为 $y = \pm a_0$ (图 2),持时 T_d 定义为

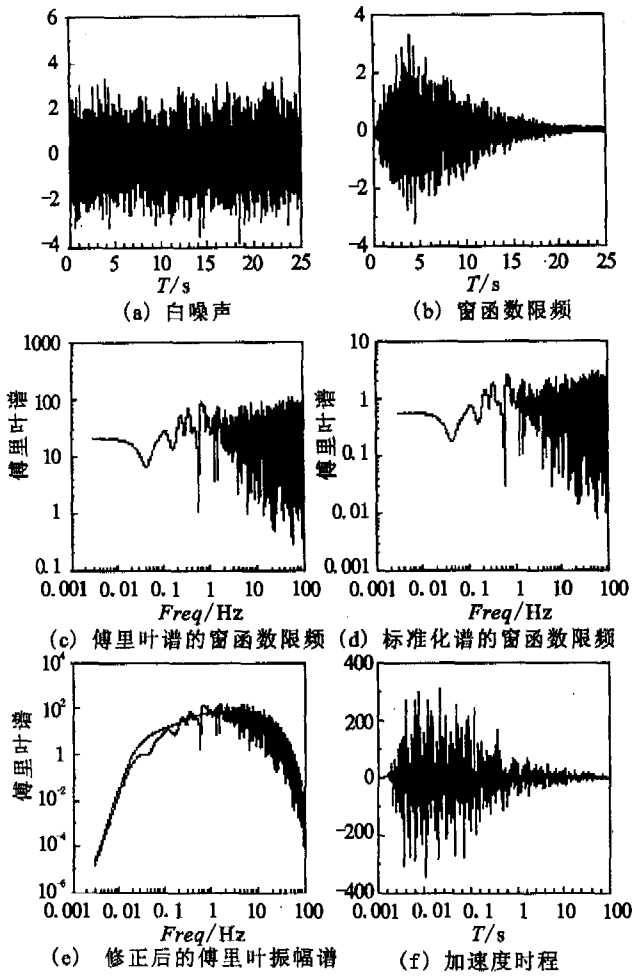


图 1 随机方法模拟地震动过程

Fig.1 Simulation process of ground motion using stochastic method.

$T_d = T_2 - T_1$, 其中 T_1, T_2 为水平线 $y = \pm a_0$ 首次与 $a(t)$ 的相交点。其中 a_0 可以取 $1/2 \sim 1/5 A_{max}$, 这种方法称为分数持时。这种确定持时的方法为国内众多学者采用, 且简单明了。计算此 3 种数据的均值、标准方差以及方差与均值的比值, 结果见表 2。模拟地震波 PGA 和 PGV 均值及其方差, 其中加速度的单位 cm/s^2 、速度 cm/s 、持续时间 s 。在此仅列出两组参数所得到的分布图(图 3(a)、(b)), 由表和图可知, 此方法计算结果离散程度与误差均较小, 在实际应用中此精度足矣。

表 1 参数分组

分组	震级/M	距离/km	场地等参数采用文件
第一组	5	10	ab98ca.dat ^[13]
第二组	6	10	ab98ca.dat
第三组	7	10	ab98ca.dat
第四组	5	10	4aktk006.dat ^[14]
第五组	6	10	4aktk006.dat

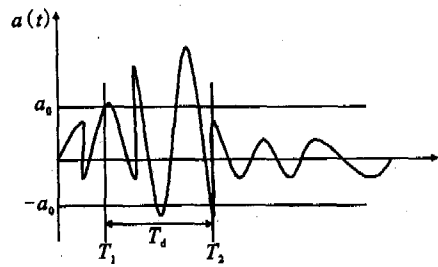


图 2 强震持时定义

Fig.2 Definition of strong earthquake duration.

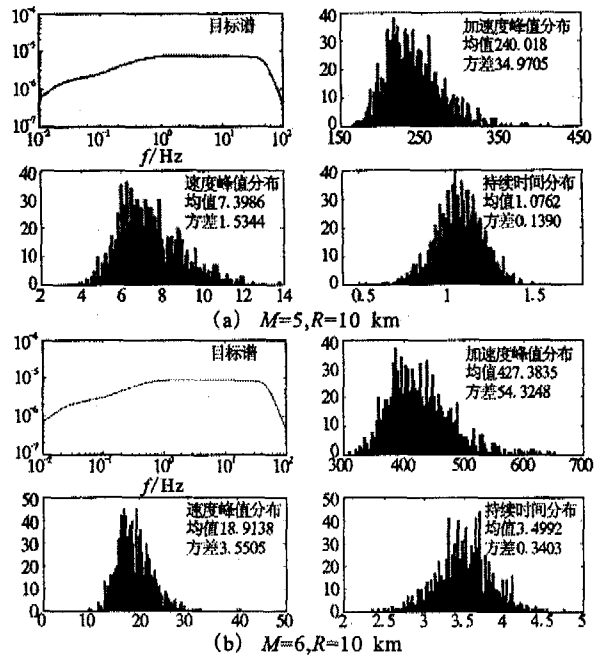


图 3 模拟地震波加速度峰值、速度峰值及持时分布

Fig.3 The PGA, PGV and duration of simulation seismic wave.

2.3 模拟实例

此方法的目的在于为满足建筑抗震规范要求, 模拟一系列地震加速度时程曲线为结构的抗震计算提供可靠的验算依据。根据建筑抗震设计规范, 列出不同烈度、不同场地类别、不同设计分组所组合成不同工况的反应谱曲线; 之后转化为对应的地震震级以及震中距或者震源距, 根据随机方法模拟得出加速度时程曲线; 然后再根据这些加速度时程计算出反应谱, 与根据规范得出的设计反应谱进行比较, 与之相吻合的保留相应的加速度时程。这样根据规范可以模拟出对应于不同地震烈度, 不同场地类别, 不同设计分组的一系列的加速度时程, 为建筑抗震设计提供了比较完备的验算依据。

以地震烈度等于Ⅶ度, 场地条件为Ⅰ类场地, 第

表2 模拟地震波 PGA PGV 均值及其方差

分组	均值			方差			方差/均值		
	加速度峰值	速度峰值	持时	加速度峰值	速度峰值	持时	加速度峰值	速度峰值	持时
第一组	240.0	7.4	1.08	35.0	1.5	0.14	0.15	0.20	0.13
第二组	427.4	18.9	3.55	54.3	3.5	0.34	0.13	0.19	0.10
第三组	704.5	44.0	11.18	74.2	7.6	0.88	0.11	0.17	0.08
第四组	156.4	4.4	1.29	21.0	0.9	0.16	0.13	0.20	0.12
第五组	586.9	73.1	6.51	69.8	15.7	0.62	0.12	0.21	0.10

一组设计地震为例来说明应用随机方法模拟人工地震动的过程以及结论。烈度衰减关系是以圆形等震线为前提,根据华北、华南地震烈度衰减关系^[15],根据规范第一组设计地震即在等效圆半径(震中距)一定时 $R=52\text{ km}$,可以得出场地烈度 I 为Ⅶ度时的震中烈度 I_0 为Ⅸ度。有经验公式^[14]

$$M = 0.68I_0 + 1.39 \lg h - 1.4 \quad (15)$$

式中 I_0 是震中烈度; h 为震源深度;在此假定 $h=10\text{ km}$ 。据此可得出对应的地震震级 $M=6$ 。根据所得到的震级和距离利用上述随机方法便可得出目标反应谱以及加速度时程。本文采用的随机方法中,距离 R 采用的是到断裂面的最短距离,而根据建筑抗震设计规范,列出不同组合工况,进而进行模拟时所采用的距离 R 却是震中距,这必然会带来一定的误差,因此本文采用公式(15)进行震中烈度与震级转换中引入震源深度 h ,在一定程度上可以减小这种误差。

为了获得有一定实际意义的人工模拟地震波,衡量它是否可取的标准是转化其为所对应的反应谱,与规范对应的标准反应谱进行比较。经过多次模拟得到的数据,作者制定以下标准作为取舍所模拟得到的地震波的依据,见图4。模拟所得反应谱与规范反应谱比较; $S_{ag}(T)$ 为规范反应谱(图中所示3条);令 $S_{am}(T)$ 为利用模拟地震动计算得到的反应谱(除图中所示3条外其他不规则曲线); $\Delta = |S_{ag}(T) - S_{am}(T)|$ 为对应每一点的差值。如果 $\Delta < 0.1$,就认为这条模拟地震动与规范反应谱比较吻合,可以作为结构抗震验算的依据,予以保留。其它烈度以及场地类别和设计地震分组的情况,可按照上述模拟方法类似得到。

3 局限性讨论

本文所阐述的模拟地震动的随机方法具有一定实际意义,不仅为结构抗震设计提供充分的验算依据,而且也为设计反应谱的拟合提供了参照数据。然而此方法也存在一定的不足之处。由图4可知,在周期大于5倍特征周期以后,大多数模拟地震波

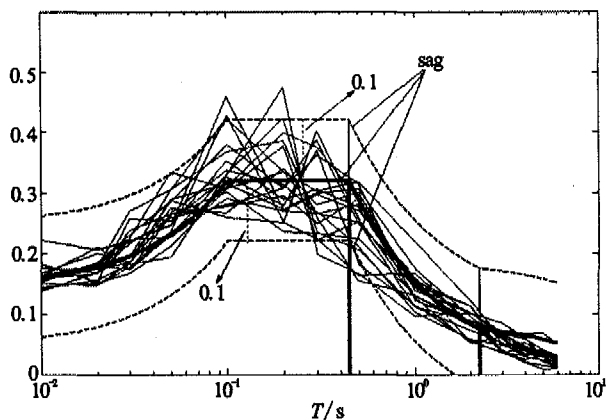


图4 模拟所得反应谱与规范反应谱

Fig. 4 Simulation spectrums and criterion spectrums.

加速度反应谱曲线都在规范反应谱下方,说明此方法计算所得结果与规范反应谱比较偏小。这是由于此方法是在大量实际数据的基础上根据统计结果得出来的经验公式,再之在参数传递过程中应用烈度衰减关系以及经验公式也会致使误差的累积增大,这是不可避免的。随着技术水平以及仪器灵敏度的提高,实际强震记录的增多,更合理的经验公式的出现,会改善这种情况。

4 结论

本文通过对随机方法模拟地震动实际应用的研究,不仅解决了实际强震记录缺乏的问题,为结构抗震设计提供了可靠的验算依据,同时为设计反应谱的拟合提供了参照数据。与此同时也验证了此方法简单明了,符合实际应用。

[参考文献]

- [1] 建筑抗震设计规范[S]. 北京:中国建筑工业出版社,2001. 26-29.
- [2] 沈聚敏,周锡元,等. 抗震工程学[M]. 北京:中国建筑工业出版社,2002.
- [3] Hanks T C. B values and $w-r$ Seismic Source Models; Implications for Tectonic Stress Variations along Active Crustal Fault Zones and the Estimation of High-frequency Strong Ground Motion[J]. J. Geophys. Res. 1979, 84(B5): 2235-2242.

- [4] McGuire R K, T C Hanks. RMS Accelerations and Spectral Amplitudes of Strong Ground Motion during the San Fernando, California earthquake [J]. *Bull. Seism. Soc. Am.* 1980, **70** (5):1907—1919.
- [5] Aki K. Scaling Law of Seismic Spectrum[J]. *J. Geophys. Res.* 1967, **72**(B2):1217—1231.
- [6] Boore D M. Stochastic Simulation of High-frequency Ground Motions based on Seismological Models of the Radiated Spectra [J]. *Bull. Seism. Soc. Am.* 1983, **73**(6):1865—1894.
- [7] Atkinson G M, D M Boore. Ground Motion Relations for eastern North America [J]. *Bull. Seism. Soc. Am.* 1995, **85**(1):17—30.
- [8] Boatwright J, G Choy. Acceleration Source Spectra Anticipated for Large Earthquakes in northeastern North America [J]. *Bull. Seism. Soc. Am.* 1992, **82**(2):660—682.
- [9] Haddon R. Earthquake Source Spectra in eastern North America [J]. *Bull. Seism. Soc. Am.* 1996, **86**(5):1300—1313.
- [10] Atkinson G M, W Silva. Stochastic Modeling of California Ground Motions [J]. *Bull. Seism. Soc. Am.* 2000, **90**(2):255—274.
- [11] David M Boore. Simulation of Ground Motion Using the Stochastic Method [J]. *Pure and Applied Geophysics* 2003, **160** (3—4):635—675.
- [12] David M, Boore. SMSIM — FORTRAN Programs for Simulating Ground Motions from Earthquakes; Version 2.0 — A Revision of OFR 96—80—A[A]. in: U. S. Geol. Surv. Open File Report[R].
- [13] Atkinson G M, D M Boore. Evaluation of Models for Earthquake Source Spectra in Eastern North America [J]. *BSSA*, 1998, **88**(4):917—934.
- [14] Atkinson G M. Earthquake source spectra in eastern North America [J]. *Bull. Seism. Soc. Am.*, 1993, **83**(6):1778—1798.
- [15] 胡聿贤. 地震工程学[M]. 北京:地震出版社, 1988. 84, 89, 172.