

文章编号: 0253-3782(2002)04-0407-06

# 考虑时间-空间变化的人工随机场模拟\*

倪永军 朱 瞩

(中国北京 100044 北京交通大学土建学院)

**摘要** 采用随频率变化的视波速代替随意给定的视波速，并在随机场的模拟中引入相位差谱来考虑地震动的频率含量非平稳性。用谱表示法按不同的设计烈度生成了时间-空间变化的非平稳人工随机场，可用于大跨度空间结构多点激励的地震动输入。

**关键词** 人工随机场 视波速 相位差谱

**中图分类号:** P315.3<sup>1</sup> **文献标识码:** A

## 引言

在进行重要建筑物，如核电站、海洋平台、大型桥梁和水坝等的抗震设计时，我国的规范中规定要采用加速度时程法分析建筑物的地震反应，这就需要选择满足一定的地震环境及场地条件和一定数量的地震加速度时程作为真正结构动力分析的输入。由于受我国强震观测条件的限制，在国内取得的加速度记录有限，而且多为小震级的，难以满足实际工程中多方面的要求。因此，人造场地加速度时间过程是非常必要的一种补充手段。近年来，各国的大跨度桥梁建设发展得极为迅速。大跨度桥梁结构具有一些特殊的动力特性，例如，远大于一般结构的超长周期、密布的特征频率、结构的大尺度使其受到地震动空间变化的强烈影响、拟静力位移对结构总响应的影响不容忽视和空间耦合特性导致结构响应的多振型参与等。这些特殊的结构动力特性，要求适用于大跨度空间结构的地震动模型能更准确地反映地震动的一些重要特性(区别于一般结构的要求)。能够综合反映地震地面运动的空间变化的各种效应，生成相应的人造地震动随机场，对于大跨度结构的地震响应分析具有重要的现实意义。

## 1 地震动空间相关性

地震动的空间变化主要包括包括如下几种效应：

- 1) 地震波在复杂介质中传播时的反射与折射而引起的地震波的空间相干性的损失，称为“不相干效应”。
- 2) 地震波以有限速度传播所引起的相位差变化，称为“行波效应”。
- 3) 场地的空间变化所带来的局域土性质的改变，并因此影响到基岩运动的幅值和频率，称为“场地效应”。

\* 国家自然科学基金(59978001)资助项目。

2001-11-14 收到初稿，2002-03-06 收到修改稿，2002-03-22 决定采用。

地震动的空间变化特征可用相干函数来描述, 本研究中将采用 Luco 和 Wong (1986) 的模型

$$\gamma(d, \omega) = \rho(d, \omega) \cdot \exp\left[i \frac{\omega d_L}{v_a}\right] = \exp\left[-\left(\frac{\alpha \omega d}{v_s}\right)^2\right] \cdot \exp\left[i \frac{\omega d_L}{v_a}\right] \quad (1)$$

式中,  $\alpha$  为不相干因子,  $v_s$  为场地土的剪切波速,  $d_L$  为波传播方向上测点间的投影距离,  $v_a$  为地震波的视波速,  $i = \sqrt{-1}$ . 式中的第一项表示不相干效应, 第二项表示行波效应. 局部场地的效应则由不同测点处的功率谱密度函数来描述.

### 1.1 不相干效应

场地土剪切波速  $v_s$  可通过现场实测确定, 它与场地土类型及覆盖层厚度等有关. 对于不同场地的剪切波速, 不同的国家、不同的抗震设计规范给出了不同的范围. 例如, 我国建筑抗震设计规范 GB50011-2001 (2001) 按照场地类型给出各类场地的剪切波速范围如表 1 所示.

Luco 和 Wang 等 (1986) 讨论了不相干因子的取值范围为 0.0~0.5, 不同剪切波速、不同波传播距离和不同相干因子对不相干效应的影响见图 1.

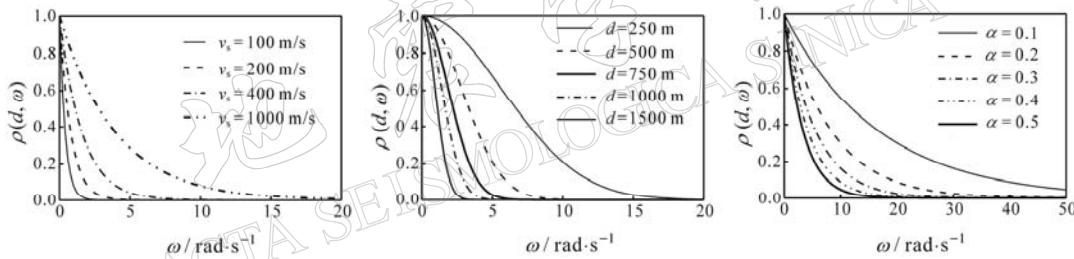


图 1 不同参数对不相干效应的影响

(a)  $\rho(d, \omega)$  ( $\alpha=0.5$ ,  $d=1000$  m); (b)  $\rho(d, \omega)$  ( $\alpha=0.5$ ,  $v_s=1$  km/s); (c)  $\rho(d, \omega)$  ( $v_s=1$  km/s,  $d=600$  m)

当  $\alpha=0$  时,  $\rho(d, \omega)=1$ , 表示不相干效应可以忽略; 不相干因子越大, 表示地震波的相干损失越大. 由图 1 可以看出, 场地土越硬 (剪切波速越大) 不相干效应越大; 在越软的场地上, 不相干效应造成的地震波的能量损失越大; 地震波传播的距离越长, 相干损失越大.

### 1.2 行波效应

地震波的视波速是研究地震波行波效应的一个重要参数. Wolf (1985) 推导出等效相波速  $C(f)$  ( $f$  为地震波频率) 与视波速存在如下关系:

$$v_a = \frac{|C^2(f)|}{\operatorname{Re}[C(f)]} \quad (2)$$

式中,  $\operatorname{Re}[\cdot]$  表示复变量的实部.

金星和廖振鹏 (1993) 根据美国西部 1933~1979 年发生的 35 次地震共 369 条加速度记录在 0.1~20 Hz 的频率范围内, 统计得出如下的等效相速度经验公式:

$$C(f) = \bar{C}(f)[1 + 0.187\eta(f)] \quad (3)$$

式中,  $\eta(f)$  为服从正态分布的  $-1 \sim 1$  之间的随机数.

$$\bar{C}(f) = 2.812 + 0.825 \lg(f) - 0.101(\lg f)^2 \quad (4)$$

按式(2)~(4)计算的视波速见图2. 在图2中, 还画出了屈铁军等(1996)由 SMART-1 台阵地震 43, 45 和 39 记录水平分量计算出的视波速回归曲线. 由图2可以看出, 屈铁军等给出的视速度曲线随着频率的增加很快增大, 在频率约为 10 Hz 之后甚至超过了 6 km/s, 接近或超过了 P 波的速度, 这是不合理的. 由金星和廖振鹏(1993)的相速度经验公式求得的视波速的曲线则相对平缓. 本研究将采用这种方法进行计算.

## 2 人工随机场的模拟

### 2.1 相位差谱

目前人们已经认识到地震加速度时程不仅强度是非平稳的, 而且频率含量也是非平稳的. 金星和廖振鹏(1993)指出, 地震动的相位信息是构成地震动强度和频率非平稳特征的主要因素. 朱昱和冯启民(1993)通过计算大量的实际地震数据, 研究了相位差谱的分布特征, 指出相位差谱不具有明显的对称性, 符合对数正态分布, 并统计分析了其在不同震级、震中距条件下的数字特征

$$\mu = \ln \lambda - \frac{1}{2} \ln \left( 1 + \frac{\xi^2}{\lambda^2} \right) \quad (5)$$

$$\sigma = \sqrt{\ln \left( 1 + \frac{\xi^2}{\lambda^2} \right)} \quad (6)$$

还给出了分布曲线的解析式

$$f(\varphi) = \frac{1}{\varphi \sigma \sqrt{2 \pi}} \exp \left[ -\frac{(\ln \varphi - \mu)^2}{2\sigma^2} \right] \quad (7)$$

用表2中的  $\mu$  和  $\sigma$  值, 由式(7)生成服从对数正态分布的相位差谱, 则在给定初始相位角  $\varphi_0$  (如  $\varphi_0=0$ )之后, 就可以按下式:

$$\varphi_{k+1} = \varphi_k + \Delta\varphi_k \quad (8)$$

产生一系列相角  $\varphi_k$  [ $k=0, 1, 2, \dots, n/2-1$ ].

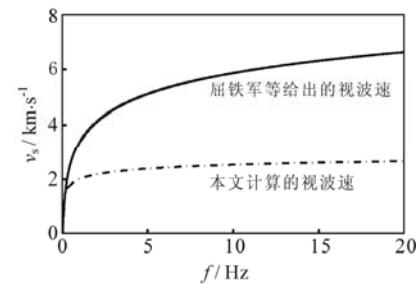


图2 不同方法计算的视波速比较

ACTA SEISMOLOGICA SINICA

表2 基岩上相位差谱的数字特征(朱昱, 冯启民, 1993)

| 震级      | 震中距/km | 变异系数 $c$ | $\mu$ | $\sigma$ |
|---------|--------|----------|-------|----------|
| 4.2~5.2 | <50    | 0.69     | 0.137 | 0.63     |
| 5.3~6.2 | <50    | 0.87     | 0.206 | 0.751    |
|         | <50    | 0.76     | 0.463 | 0.678    |
| 6.3~7.0 | 50~100 | 0.93     | 0.418 | 0.792    |
|         | >100   | 0.65     | 0.742 | 0.599    |

## 2.2 用谱表示法生成人工随机场

用谱表示法生成人工随机场的方法如下：

1) 选择合适的场地功率谱密度函数  $S(\omega)$ . 本研究将采用 Clough 和 Penzien 修正 Kanai-Tajimi 的谱

$$S(\omega) = S_0 \frac{\omega_g^4 + 4\xi_g^2 \omega_g^2 \omega^2}{(\omega^2 - \omega_g^2)^2 + 4\xi_g^2 \omega_g^2 \omega^2} \cdot \frac{\omega^4}{(\omega^2 - \omega_f^2)^2 + 4\xi_f^2 \omega_f^2 \omega^2} \quad (9)$$

式中,  $S_0$  为谱强度因子, 反映地震动的强弱;  $\omega_g$  和  $\xi_g$  分别为场地覆盖土层的卓越频率和阻尼比;  $\omega_f$  和  $\xi_f$  为频率和阻尼的滤波参数.

2) 选择合适的场地参数. Kiureghian 和 Neuenhofer (1992) 按照不同的场地条件给出如下的谱参数( $F$  表示硬场,  $M$  表示中等场,  $S$  表示软场)

$$\omega_g(F) = 15 \text{ rad/s} \quad \omega_g(M) = 10 \text{ rad/s} \quad \omega_g(S) = 5 \text{ rad/s} \quad \xi_g = \omega_g / 25 \quad (10)$$

$$\omega_f = \omega_g / 10 \quad \xi_f = 0.6 \quad (11)$$

谱强度因子  $S_0$  可由下式求出:

$$S_0 = \frac{a_{g,\max}^2}{p^2 \cdot c^*} \quad (12)$$

其中,  $a_{g,\max}$  为地面运动峰值加速度,  $c^*$  为过程的变异系数,  $p$  为峰值因子.

$$p = \sqrt{2 \cdot \ln \frac{2.8 \cdot \Omega \cdot t_d}{2\pi}} \quad (13)$$

式中,  $t_d$  为过程的持时,  $\Omega$  为场地参数. Monti 等 (1996) 按不同的场地给出为

$$c^*(F) = 184.111 \quad c^*(M) = 125.529 \quad c^*(S) = 90.164 \quad (14)$$

$$\Omega(F) = 46.276 \text{ rad} \quad \Omega(M) = 21.963 \text{ rad} \quad \Omega(S) = 6.498 \text{ rad} \quad (15)$$

3) 选择合适的强度包络函数. 本文采用的强度包络函数  $A(t)$  为

$$A(t) = \begin{cases} \left(\frac{t}{t_1}\right)^2 & 0 \leq t < t_1 \\ 1.0 & t_1 \leq t < t_2 \\ e^{-c(t-t_1)} & t_2 \leq t \leq t_d \\ 0.0 & t > t_d \end{cases} \quad (16)$$

式中,  $t_1$ ,  $t_2$  和  $c$  为形状参数;  $t_1$  和  $t_2$  的取值如表 3.

$c$  的取值见陈永祈 (1981) 的文献.

4) 选择合适的相干函数模型. 相干函数模型采用式(1). 对于硬场, 本研究取不相干因子  $\alpha = 0.5$ , 场地土剪切波速  $v_s$  取为 1 km/s.

5) 确定视波速的合理表达式. 视波速  $v_a$  可由式(2)~(4) 计算得出.

6) 生成人工随机场

表 3 地震动合成形状参数取值表

| 类型  | $t_d/\text{s}$ | $t_1$ | $t_2$ |
|-----|----------------|-------|-------|
| 近场  | 12             | 1.8   | 6.0   |
| 中远场 | 16             | 2.4   | 8.0   |

$$F(d, t) = A(t) \cdot \rho(\omega, d) \cdot \sum_{k=0}^{n-1} \sqrt{4S(\omega)\Delta\omega} \cos \left[ \omega_k \left( t - \frac{d}{v_a} \right) + \varphi_k \right] \quad (17)$$

其中,  $\varphi_k$  为区间  $(0, 2\pi)$  内的随机相角.

由式(17)计算出的  $a_{g,\max} = 0.2 \text{ g}$  和  $a_{g,\max} = 0.4 \text{ g}$  (分别对应于烈度为 VIII 度和 IX 度时的设计峰值地震加速度值) 时的人工随机场见图 3. 限于篇幅, 仅列出了  $x_R$  分别为 0 和 1 000 m 时的人工地震波.

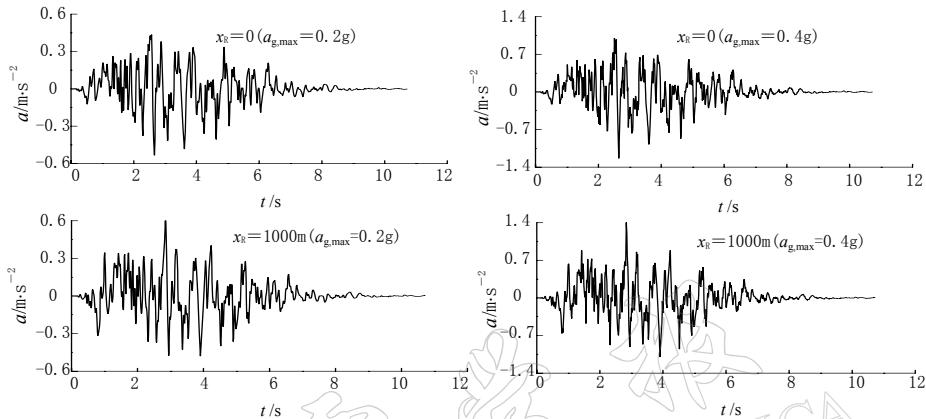


图 3 初始相角  $\varphi_0 = 0$  时的人工地震波

### 3 结语

本文讨论了 Luco 和 Wong (1986) 模型中剪切波速、地震波传播距离以及不相干因子等参数的取值对相干函数的影响. 用地震波的视速度来表征地震波的行波效应, 并建议由地震波的等效相速度来确定频率依赖的视速度的方法, 与屈铁军等 (1996) 基于 Smart-1 地震记录回归出的视速度进行了比较, 说明本研究方法计算的视速度更为合理. 在用谱表示法生成人工随机场的模型中, 采用相干函数来表征地震动空间变化的不相干效应; 用视速度表征地震波的行波效应; 引入了服从对数正态分布的相位差谱生成随机相角, 反映地震动随机场的频谱非平稳特性; 用强度包络函数进行调制的方法, 生成了时-空非平稳的人工随机场. 其中, 地震动的幅值可按照场地的设计烈度所对应的峰值加速度确定. 该人工随机场可用于大跨度空间结构在考虑多支承激励效应时的地震动输入.

由于本文采用的参数(特别是相位差谱)是基于基岩的统计结果, 其它类型场地的参数取值以及相应的人工随机场的生成尚有待于进一步研究.

### 参 考 文 献

- 陈永祁. 1981. 拟合标准反应谱的人工地震动 [J]. 建筑结构学报, 4(1): 34~42  
 金星, 廖振鹏. 1993. 地震动相位特性的研究 [J]. 地震工程与工程振动, 13(1): 7~13  
 屈铁军, 王君杰, 王前信. 1996. 空间变化的地震动功率谱的实用模型 [J]. 地震学报, 18(1): 55~62  
 朱昱, 冯启民. 1993. 地震加速度相位差谱分布的数字特征 [J]. 地震工程与工程振动, 13(1): 30~37  
 GB50011-2001. 2001. 建筑抗震设计规范 [S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 16

- Wolf J P 著. 1985; 吴世明, 唐有志, 陈龙珠, 等译. 1989. 土-结构动力相互作用[M]. 北京: 地震出版社, 150~152
- Der Kiureghian A, Neuenhofer A. 1992. Response spectrum method for multi-support seismic excitations[J]. *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, **21**: 713~740
- Luco J E, Wong H L. 1986. Response of a rigid foundation to a spatially random ground motion[J]. *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, **14**: 891~908
- Monti G, Nuti C, Pinto P E. 1996, Nonlinear response of bridges under multisupport excitation[J]. *Journal of Structural Engineering*, **122**(10): 1 147~1 159

## SIMULATION OF ARTIFICIAL RANDOM FIELD CONSIDERING THE TEMPORAL-SPATIAL VARIATION

Ni Yongjun Zhu Xi

(College of Civil Engineering and Architecture, Northern Jiaotong University, Beijing 100044, China)

**Abstract:** In this paper an apparent wave velocity varying with the frequency of earthquake wave was adopted rather than an arbitrary one. The phase difference spectrum was introduced to consider the non-stationary properties of frequency contents in simulating artificial random field. The non-stationary random field on hard site considering the temporal-spatial variation was simulated by the way of spectral representation method. This random field can be used as the input of earthquake ground motion of the seismic response analysis of large-span spatial structures considering the effect of multi-supported excitation.

**Key words:** artificial random field; apparent wave velocity; phase difference spectrum