



空间相关地震动场模拟的研究^{*}

李小军 赵凤新 胡聿贤

(中国北京 100081 国家地震局地球物理研究所)

主题词 场地条件 生命线系统 地震动场 相位差谱

重要性极高的生命线系统工程具有一个共同的特点是其空间分布与延伸性. 在同一次地震下, 这类结构各部分受到的地震荷载将不同. 其结构(系统)地震反应分析需要地震动场作为地震输入. 利用地震动观测资料, 人们发现地震动场为既非空间完全相关亦非空间完全不相关的随机场. 近些年来空间相关地震动场模拟的研究得到了发展, 人们基于相关函数、相关系数、功率谱密度函数或相干函数的统计经验关系给出了各自的随机地震动场模型(冯启民, 胡聿贤, 1981; Hao *et al.*, 1989; Yamazaki, Turke, 1992; Abrahamson, 1992). 在这些模型中, 点间距离被作为描述地震动空间相关性关系的主要参数. 但我们认为, 点间距离本身并非直接控制地震动空间性的参数. 利用点间距离量对地震动的空间相关性进行统计分析, 之所以也能作出某些合理的解释, 其原因在于, 对于特定的地震及场地来讲, 特定方向上的点间距离可间接地反映波传播的路径、震源与场地的相对方位等的影响. 因此, 要建立描述地震动相关性的有效模型, 首先必须选择好合适的物理量. 本文将系统地介绍笔者最近提出的空间相关地震动场模拟方法的基本思想. 该方法中, 点间距离、震级、震源距、研究场地上空间点处震源距差以及震源与场地的相对方位等因素均得到了合理考虑. 这里, 点间距离是作为随机不确定因素影响的控制量引入的, 而对于一给定地震, 震源距、震源距差被作为确定地震动空间相关性的主要因素. 同时, 本文还将简单介绍震源体大小、研究场地上地震动场确定中局部场地条件影响以及地震发生非确定性影响的考虑方法.

1 地震动场模型

地震动的空间相关性与震源特性、震源相对于场地的方位、波传播途径及介质特性有关. 对于局部非均匀场地情况, 地震动空间相关性与局部场地条件也有着密切的关系, 而且其关系十分复杂. 因此, 局部场地条件的影响应作特殊的考虑.

模型中, 地震震级(M)、空间离散点的震源距(R)、震源距的变化值(ΔR)以及空间离散点间距离点(d)被引入分别用以描述震源、波传播途径、震源相对场地的方位以及随机不确定性因素的影响. 模型的基本思想如下:

- (1) 地震动场 $u(x, y, z, t)$ 以空间离散形式表述, 即地震动场 $u(x, y, z, t)$ 由空间离散点 $P(x_p, y_p, z_p)$ 的地震动 $u_p(t)$ 系列表述.
- (2) 空间离散点 P 处的地震动 $u_p(t)$ 以富里叶幅值谱 $U_p(f)$ 及富里叶相位谱 $\varphi_p(f)$ 表述.

* 国家自然科学基金资助项目. 国家地震局地球物理研究所论著 96A0075.

1995-12-14 收到初稿, 1996-08-28 收到修改稿并决定采用.

$$u_P(t) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^{\infty} U_P(f) e^{-i(2\pi ft + \varphi_P(f))} 2\pi df \quad (1)$$

(3) 为了更精确地表述小空间范围内空间变化引起的地震动的变化, 地震动富里叶幅值谱 $U_P(f)$ 及相位谱 $\varphi_P(f)$ 被分为两部分, 即空间大尺度部分及空间小尺度部分, 因而有如下关系:

$$\begin{aligned} U_P(f) = & U_l(M, R_p, f) + U_s(M, R_o, d_p, \theta_p, f) + \\ & \varepsilon_{U_l}(M, R_p, f) + \varepsilon_{U_s}(M, R_o, d_p, f) \end{aligned} \quad (2)$$

$$\varphi_P(f) = \varphi_P(f_0) + \int_{f_0}^f \Delta\varphi_P(f) df \quad (3)$$

$$\begin{aligned} \Delta\varphi_P(f) = & \Delta\varphi_l(M, R_p, f) + \Delta\varphi_s(M, R_o, d_p, \theta_p, f) + \\ & \varepsilon_{\Delta\varphi_l}(M, R_p, f) + \varepsilon_{\Delta\varphi_s}(M, R_o, d_p, f) \end{aligned} \quad (4)$$

更进一步, 关系式(2)及(4)可改写为

$$\begin{aligned} U_P(f) = & U_l(M, R_p, f) + U_s(M, R_o, \Delta R_p, f) + \varepsilon_{U_l}(M, R_p, f) + \\ & \varepsilon_{U_s}(M, R_o, d_p, f) \end{aligned} \quad (5)$$

$$\begin{aligned} \Delta\varphi_P(f) = & \Delta\varphi_l(M, R_p, f) + \Delta\varphi_s(M, R_o, \Delta R_p, f) + \\ & \varepsilon_{\Delta\varphi_l}(M, R_p, f) + \varepsilon_{\Delta\varphi_s}(M, R_o, d_p, f) \end{aligned} \quad (6)$$

其中

$$\Delta R_p = R_p - R_o = (R_o^2 + d_p^2 - 2R_o d_p \cos\theta_p)^{0.5} - R_o \quad (7)$$

上式中, f 为工程频率, 角标“ O ”表示(场地内)参考点, R_o 及 R_p 分别为参考点 O 及任意点 P 的震源距, ΔR_p 为 P 点与 O 点的震源距的差值, d_p 为 P 与 O 两点的距离, θ_p 为 OP 与 OE 方向的夹角(这里 E 点表示震源位置), U_l 及 $\Delta\varphi_l$ (这里“ l ”表示“空间大尺度”)为大尺度空间变化情况下地震动场的统计富里叶幅值谱及相位谱关系, U_s 及 $\Delta\varphi_s$ (这“ s ”表示“空间小尺度”)为小尺度空间变化情况下地震动场的统计富里叶幅值谱及相位谱关系, ε_{U_s} 及 $\varepsilon_{\Delta\varphi_s}$ 分别表示大尺度空间变化情况下随机不确定因素对地震动场的富里叶幅值谱及相位谱的影响, ε_{U_s} 及 $\varepsilon_{\Delta\varphi_s}$ 分别表示小尺度空间变化情况下随机不确定因素对地震动场的富里叶幅值谱及相位谱的影响, $\varphi_P(f_0)$ 为 P 点处地震动相位谱对应于参考频率 f_0 的值.

因为在小空间范围内地震动富里叶幅值谱的变化并不显著, 且这一小变化对地震动空间相关性的影响非常之小, 式(3)可被简写为

$$U_P(f) = U_l(M, R_p, f) + \varepsilon_{U_l}(M, R_p, f) \quad (8)$$

方法中, 富里叶相位差谱被分为空间大尺度部分与空间小尺度部分, 空间大尺度部分中的空间变化描述参数是震源距 R , 它是一大尺度空间描述量, 其值仅要求精确到 1 km; 而空间小尺度部分中的空间变化描述主要参数是震源距差值 ΔR (相对于空间参考点 O), 它是一小尺度空间描述量, 其值应精确到 1 m. 实际上, 空间小尺度部分是对空间大尺度部分在描述小空间范围内地震动变化不够精确的一种补充描述. 地震动相位差的空间小尺度部分 $\Delta\varphi_s$ 又由两部分构成: 确定性部分及不确定性部分. 确定性部分所描述的是地震动相位差谱的平滑谱(沿频率 f)在一小空间范围内变化的规律性值; 而不确定性部分所描述的是地震动相位差谱的在一小空间范围内变化的随机值. 不确定性部分包括由平滑谱进行规律性值统计时的统计离散值及实际相位差谱与其平滑谱之间的差值随空间变化的随机值.

我们的方法所涉及的各关系均可利用地震台点或地震台阵的地震记录资料, 借助于统计分析方法获得. 其中空间大尺度部分的关系可借用地震特性研究工作中人们所得的富里叶幅值谱、富里叶相位差谱的统计衰减关系(赵凤新, 1992; Lee, Trifunin, 1993; 赵凤新等, 1995), 而空间小尺度部分的关系则是我们的研究所要获取的.

2 模型的特性

在我们的模型中, 地震动场由空间离散点上的地震动来模拟, 而空间点上的地震动的给出直接基于

富里叶幅值谱及相位谱的统计关系。模型在给出地震动场时并没有直接涉及到地震动的相关性程度描述量(如互功率谱密度函数或相干函数),因此,有必要分析模型所模拟出的地震动场的空间相关性。分析表明,所模拟出的地震动场中 J 与 K 两点处的地震动的互功率谱密度函数可近似地用下式表示:

$$S_{KJ}(if) = S(f) \cdot \rho(f) \cdot e^{-i\theta(f)} \quad (9)$$

$$S(f) = U_K(f) \cdot U_J(f) \quad (10)$$

$$\rho(f) = \sin\left(\frac{\Delta\varphi_K(f) - \Delta\varphi_J(f)}{2}\right) / \left(\frac{\Delta\varphi_K(f) - \Delta\varphi_J(f)}{2}\right) \quad (11)$$

$$\theta(f) = \varphi_K(f) - \varphi_J(f) - \frac{\Delta\varphi_K(f) - \Delta\varphi_J(f)}{2} \quad (12)$$

式中, i 为单位复数, $U_K(f)$ 及 $U_J(f)$ 分别为 K 与 J 处地震动的富里叶幅值谱, $\varphi_K(f)$ 、 $\varphi_J(f)$ 及 $\Delta\varphi_K(f)$ 、 $\Delta\varphi_J(f)$ 分别为 K 与 J 处地震动的富里叶相位谱及相位差谱。式(9)、(10)、(11)及(12)表明, 地震动的空间相关性间接地在富里叶谱的空间变化关系中得到了反映。式(9)中的 $\rho(f)$ 为相干函数。从式(11)可以看出, 地震动的空间相关性主要是由地震动的富里叶相位差谱的变化所决定。另外, 因为对小空间范围内的点 K 及 J , $\Delta\varphi_i(M, R_K, f) - \Delta\varphi_i(M, R_J, f)$ 近似为零(不考虑随机性), 所以, 地震动的空间相关性主要是由地震动的富里叶相位差谱的空间小尺度部分的变化所决定。

3 震源大小的考虑

上述模型中, 震源距 R 及震源距的变化值 ΔR 被用以表述震源与研究场地离散点间的相对方位及方位的变化。因此, 不难知道此处的震源被视为点源。点源这一假设对于小震或大震远震是合适的, 但对于大震近中震并不十分合适。为此, 应对这一问题加以考虑。这一问题可借用现有的地震动合成的小震合大震的思想来考虑(赵凤新, 1992), 即将大的震源体分割为若干个小的子震源体, 首先将子震源体视为点源体, 根据上面所述方法确定每一子震源体所对应的研究场地上的地震动场, 尔后利用地震动场叠加方法获得总的地震动场, 即大震源体所对应的地震动场。

4 局部场地条件影响的考虑

实测地震动资料与理论的分析结果均表明, 局部场地条件对地震动场具有十分显著的影响, 且基岩场地上的地震动(场)特性具有较好的统计规律, 至少相对于土层场地而言是如此。因此, 我们建议采用间接性方法确定土层场地上的地震动场。其基本思想如下: ① 首先模拟出研究场地下卧基岩中的地震动场; ② 以场地下卧基岩中的地震动场作为地震动输入, 利用局部场地条件对地震动影响分析的时空离散方法(如有限元-有限差分方法(李小军, 1993))进行场地反应分析, 给出土层场地上空间离散点处的地震动(时程)的计算值, 即土层场地上地震动场的空间离散值。

5 非确定性地震的考虑

前面所给出的地震动场的模拟方法及局部场地条件影响的考虑方法, 均是针对于给定性地震而言的。然而, 在对未来地震进行估计时, 人们不可能确切地给出地震发生的空间位置与震级。因此, 如何考虑非确定性地震是应解决的另一个问题。我们考虑这一问题的基本思路如下: ① 视每一可能发生的地震为给定地震, 并给出其所对应工程场地地震动场; ② 分别以每一地震动场作为地震动输入, 计算结构(系统)的地震反应, 给出反应量的计算值; ③ 利用现有的地震危险性综合概率法的基本思想, 计算考虑所有非确定性地震综合作用的结构(系统)反应量。

6 结语

本文介绍了我们提出的一种地震动场的模拟方法, 方法中包括地震动场的空间离散表示、借助于地

震动富里叶谱(包括幅值谱、相位谱、相位差谱)直接模拟出空间离散地震动场、震源大小的考虑、局部场地条件对地震动场影响分析及非确定性地震的考虑等内容。本文仅对我们的方法的基本思想作了介绍,方法的具体细节及方法所涉及的经验关系的统计分析等将另文叙述。

参 考 文 献

冯启民,胡聿贤,1981.空间相关地面运动的数学模型.地震工程与工程振动,1(2):1~8

李小军,1993.非线性场地地震反应分析方法的研究.国家地震局工程力学研究所博士学位论文,177~230

赵凤新,1992.时程的相位差特性及设计地震动的合成.国家地震局地球物理研究所博士学位论文,89~126

赵凤新,胡聿贤,李小军,1995.地震动相位谱的统计规律.自然灾害学报,4(增刊):49~56

Abrahamson N A, 1992. Generation of spatially incoherent strong motion time history. *Tenth World Conference on Earthquake Engineering*. Madrid, Spain. 845~850

Hao H, Oliveira C S, Penzien J, 1989. Multiples-station ground motion processing and simulation based on smart-1 array data. *Nuclear Engineering and Design*, 111: 293~310

Lee V W, Trifunic M D, 1993. Empirical scaling of Fourier amplitude spectra in former Yugoslavia. *European Earthquake Engineering*, (2): 4~61

Yamazaki Y, Turke T, 1992. Spatial variation study on earthquake ground motion observed by the chiba array. *Tenth World Conference on Earthquake Engineering*. Madrid, Spain. 651~656