

# 不規則振動論に基づく非定常地震動予測モデルの応答スペクトル規定法

岐阜大学工学部

○横川 真也

岐阜大学工学部

正会員

能島 暢呂

杉戸 真太

古本 吉倫

岐阜大学大学院

山根 光雄

## 1. はじめに

Sugito ら<sup>1)</sup>により開発された工学的基盤面における非定常地震動予測モデル (EMPR) は、マグニチュードと震源距離の2つのパラメータから地震動の時刻歴波形を得る EMPR-I、および、小断層の合成により断層の広がりや破壊伝播方向の影響など詳細な震源特性を考慮できる EMPR-II という2つのクラスより構成されている。

本研究は、応答のランダム性を定量的に記述可能である不規則振動論に基づいて、EMPR モデルの非定常パワースペクトルを規定する断層パラメータから、応答スペクトルの確率分布を直接的に求める方法を提案するものである。すでに EMPR-I モデルにおいては、その妥当性が確認されており<sup>2)</sup>、その結果をもとに EMPR-II モデルへの適用を検討する。

## 2. 非定常地震動予測モデル (EMPR-II)<sup>1)</sup>

EMPR-II モデルは図1のようなパラメータを持つ震源断層を EMPR-I の  $M=6$  相当の小断層に分割し、各小断層ごとの非定常パワースペクトルを断層の破壊過程、サイト方向等を考慮しながら、次式のように重ね合わせて地震動を推定する。重ね合わせの概念を図2に示す。

$$\sqrt{G_{x0}(t, 2\pi f)} = \frac{N_G(M_0)}{N_x \cdot N_y} \gamma(f, m_0) \sum_{i=1}^{N_x} \sum_{j=1}^{N_y} \sqrt{G_{ij}(t, 2\pi f)} \quad (1)$$

ここで、 $\gamma(f, M_0)$  は小規模断層の重ね合わせ個数をすべての振動数で一定値  $N_G$  とすることによる誤差を補正する関数である。また、各小断層の非定常パワースペクトル  $G_{ij}(t, 2\pi f_k)$  は、次式で示す関数でモデル化されている。

$$\sqrt{G_{ij}(t, 2\pi f)} = \alpha_{m_{ij}}(f) \frac{t - t_{s_{ij}}(f)}{t_{p_{ij}}(f)} \exp\left(1 - \frac{t - t_{s_{ij}}(f)}{t_{p_{ij}}(f)}\right) \quad (\text{ただし, } 0 \leq t \leq t_{s_{ij}} \text{ では } 0)$$

ここに、 $\alpha_{m_{ij}}(f)$ : 強度パラメータ ( $\sqrt{G_{ij}(t, 2\pi f)}$  の最大値)、 $t_{s_{ij}}(f)$ : 時間パラメータ ( $G_{ij}(t, 2\pi f)$  の立ち上がり時間)、 $t_{p_{ij}}(f)$ : 継続時間パラメータ ( $t_{s_{ij}}(f)$  から最大値に至るまでの時間) である。

## 3. ランダム振動論の EMPR-I モデルへの適用<sup>2)</sup>

線形一自由度系の固有円振動数、固有振動数、固有周期、減衰定数をそれぞれ、 $\omega_0$ 、 $f_0$ 、 $T_0$ 、 $h$  とする。EMPR-I モデルについては、ランダム振動論に基づいて、加速度応答スペクトルの推定式を次式のように導いた<sup>2)</sup>。

$$S_A(f_0, h, P_d) = \beta \cdot \alpha_m(f) \sqrt{\frac{\pi \omega_0}{4h}} \cdot \sqrt{1 - \exp(-2h\omega_0 t)} \quad (3)$$

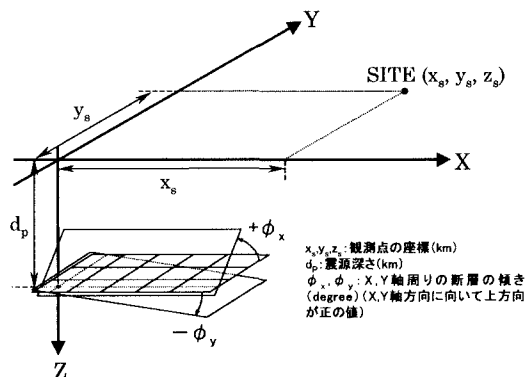


図-1 EMPR-II モデルのパラメータ概念図

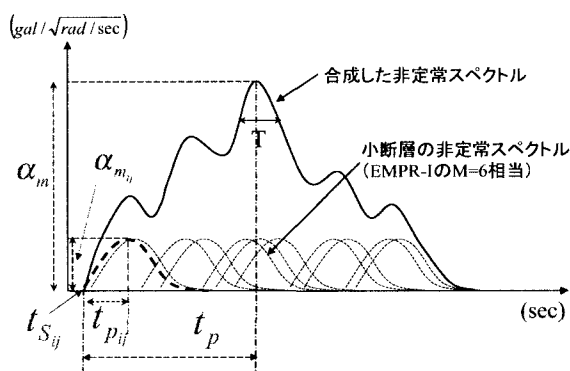


図-2 非定常スペクトルの重ね合わせの概念

$$\beta = \sqrt{2 \ln \left[ \frac{z \left\{ 1 - \exp \left( -q(t) \sqrt{\pi \ln z} \right) \right\}}{1 - \frac{1}{z}} \right]} \quad (4)$$

$$q(t) \cong 2 \sqrt{\frac{h \{ 1 + 2 \exp(-h\omega_0 t) - \exp(-2h\omega_0 t) \}}{\pi \{ 1 - \exp(-2h\omega_0 t) \}}} \quad (5)$$

(2)式(4)の  $\beta$  はピーク係数で、Vanmarcke<sup>3)</sup> による結果を改善したものである。 $q(t)$  は、振動数の過渡特性を表わす項であり、 $P_d$  は時間  $t$  内に閾値  $d$  を超えない確率を表わす。シミュレーションにより検討した結果、 $k=1$  とするのが妥当と判断された。ここで、最大値  $\alpha_m(f_0)$  に相当する地震動が継続時間パラメータ  $t_p$  に比例した等価継続時間  $T = kt_p$  だけ継続すると仮定すると、 $z$  は次式で表わされる。

$$z = \frac{2T}{T_0} \cdot \frac{1}{-\ln P(d, T)} = \frac{2kt_{p_{ij}} f_0}{-\ln P_d} \quad (6)$$

## 4. EMPR-II モデルに基づく応答スペクトルの算出

本研究では、式(3)と同様の形で、EMPR-II モデルの応答スペクトルを規定する。まず、図2のように、合成

表-1 震源パラメータ<sup>1)4)</sup>

| 断層パラメータ               |    |                  |       | 関係式                 |                                        |
|-----------------------|----|------------------|-------|---------------------|----------------------------------------|
| 断層の X 軸周りの角度 (degree) | 90 | 地震波伝播速度 (km/sec) | 3.0   | 地震モーメント (dyne · cm) | $\log M_0 = 16.0 + 1.5 \cdot M$        |
|                       |    | 破壊伝播速度 (km/sec)  | 2.5   | 小断層の重ね合わせ数          | $N_G = 10^{-10.16} \times M_0^{0.409}$ |
| 断層の Y 軸周りの角度 (degree) | 0  | 震源深さ (km)        | 30.0  | 断層の長さ (km)          | $\log L = 0.6M - 2.9$                  |
|                       |    | 破壊開始小断層 (要素番号)   | (1,1) |                     |                                        |

された非定常パワースペクトルの最大値を  $\alpha_m(f)$  とする。また、等価継続時間  $T$  は小断層の継続時間パラメータ  $t_{pij}(f)$  そのものを用いた。等価継続時間を図2の  $t_p(f)$  とした場合についても検討したが、応答スペクトルを過大に評価する場合が多かった。その傾向は、着目点が断層の破壊伝播方向と反対側にある場合や、断層が長い場合など、各小断層からの地震波到達の時間差が大きくなる場合において顕著であった。

### 5. 数値計算例

7回のシミュレーション試行による応答スペクトルのサンプルと、不規則振動論より導かれる非超過確率  $P_d = 20\%, 50\%, 80\%$  に相当する理論値との比較結果の一例を図3に示す。図3の上から順に、着目点を破壊伝播方向と反対の方向に150m, 50m, 正方向に50m, 150mとし、 $\pm 50m$  については  $M = 7$ ,  $\pm 150m$  については  $M = 8$  とした場合の結果である。いずれも減衰定数を  $h = 0.05$  としている。また、数値計算に用いた断層パラメータおよび、関係式を表1に示す。

これらの結果を見ると、シミュレーション結果のほとんどが理論値の非超過確率20%と80%のラインの間にあり、おおむね精度良い結果が得られている。ただし、50%のラインでは、やや過小もしくは過大評価となっているものもある。

### 6. おわりに

EMPR-IIのモデルパラメータは多岐にわたる。本研究では、シミュレーションを行うことなく、できるだけ数少ないパラメータで応答スペクトルを規定することを目指している。今後、多数のケーススタディーを実施し、等価継続時間の設定法などの再検討を通じて、より精度良く規定可能なモデルとしていきたい。

### 参考文献

- 1) Sugito, M., Furumoto, Y. and Sugiyama, T.: Strong Motion Prediction on Rock Surface by Superposed Evolutionary Spectra, 12th World Conference on Earthquake Engineering, 2111/4/A, CD-ROM, 2000.
- 2) 山根光雄, 能島暢呂, 杉戸真太, 古本吉倫: 非定常地震動予測モデル EMPR に基づく応答スペクトルの規定法, 地震工学研究発表会講演論文集, pp381~384, 2001.3.
- 3) Vanmarcke, E.H.: Properties of spectral moments with applications to random vibration, Proc. of ASCE, EM2, pp.425~446, Apr., 1972.
- 4) 松田時彦: 活断層から発生する地震の規模と周期について, 地震, 第28巻, 269-283, 1975.

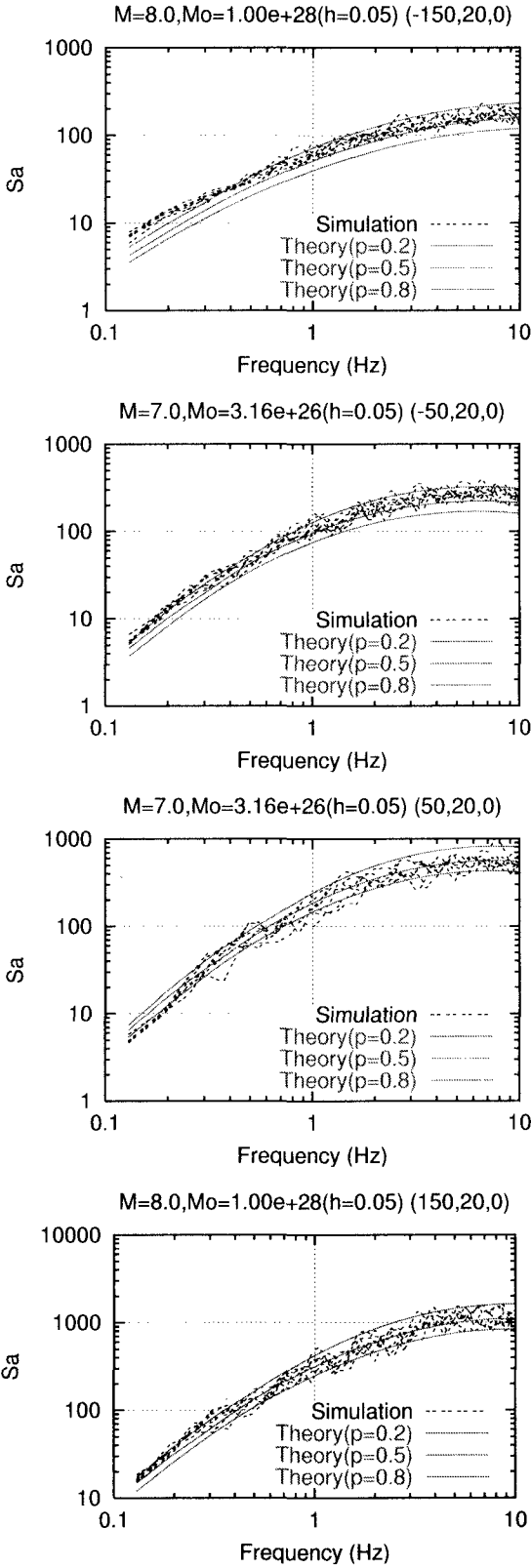


図-3 シミュレーション結果と理論値の比較